

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tváření materiálu

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Fázové transformace probíhající během ochlazování  
laboratorně válcovaných ocelových tyčí

Phase transformations taking place at cooling of laboratory  
rolled steel rods

Student:

Bc. Jakub Rusz

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Kawulok, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra tváření materiálů

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Rusz**  
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství  
Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie  
Téma: **Fázové transformace probíhající během ochlazování laboratorně  
válcovaných ocelových tyčí**  
**Phase transformations taking place at cooling of laboratory rolled steel  
rods**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor – válcování ocelových tyčí, ARA diagramy
2. Laboratorní válcování tyčí a měření jejich povrchové teploty během ochlazování
3. Analýza ochlazovacích křivek
4. Metalografické rozborů laboratorních vývalků
5. Diskuse výsledků – vliv teploty válcování na průběh fázových transformací

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOLLEROVÁ, M. et al. *Válcování*. Bratislava: ALFA, 1991.  
[2] LEE, Y. *Rod and Bar Rolling: Theory and Applications*. New York: Marcel Dekker, 2004.  
[3] SCHINDLER, I. et al. Vliv předchozí deformace na fázovou transformaci v průběhu ochlazování válcovaných tyčí z nízkouhlíkové oceli. *Hutnické listy*, 2016, roč. 68, č. 6, v tisku.  
[4] KAWULOK, R. et al. Effect of deformation on the CCT diagram of steel 32CrB4. *Metalurgija*, 2015, roč. 54, č. 3, s. 473-476.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kawulok, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Rostislav Kawulok

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 22.04.2016

  
prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **I.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísečné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísečné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání DP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část DP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran a celkový rozsah DP bude min. 45 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno.

Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

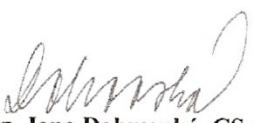
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ..... 19.4.2016

..... JAKUB RUSZ .....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat projektu č. LO1203 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - Program udržitelnosti“, financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, díky němuž jsem mohl své náročné experimentální práce provést na špičkových laboratorních zařízeních. Největší díky pak patří mému vedoucímu práce panu Ing. Petr Kawulokovi, Ph.D., za jeho odborné konzultace, připomínky, cenné rady a jeho čas, který mi věnoval při zpracovávání mé diplomové práce. Dále bych poděkoval jeho kolegům za pomoc při provádění experimentu, a paní Subikové při analýze mikrostruktur.

## **Abstrakt**

S využitím laboratorní polospojité válcovny tyčí kruhového průřezu a pomocí dilatometrických testů byl zkoumán vliv parametrů tváření na teploty fázových přeměn  $Ar_3$  a  $Ar_1$  při volném ochlazování vývalků z nelegované nízkouhlíkové konstrukční oceli S235JR. S klesající průměrnou teplotou válcování se teplota  $Ar_3$  zvyšovala, zatímco velikost celkové deformace, resp. různý stupeň protváření laboratorních vývalků neměl výrazný vliv na velikost teplot  $Ar_3$ . V případě teplot  $Ar_1$  nebyl prokázán žádný vliv průměrné teploty válcování na jejich velikost. Větší stupeň protváření laboratorních vývalků měl však za následek snížení teplot  $Ar_1$ . Na základě vyhodnocení dilatometrických testů byl pro dané podmínky ohřevu a rychlosti ochlazování zkonstruován ARA diagram bez i s vlivem předchozí deformace. Aplikace deformace měla za následek rozšíření feritické oblasti, tj. posun bodů  $Ar_3$  k vyšším teplotám a  $Ar_1$  k nižším teplotám.

## **Klíčová slova**

Laboratorní válcování a ochlazování, dilatometrické testy, teploty fázových přeměn, ARA diagram, ocel S235JR.

## **Abstract**

With using of laboratory semi-continuous rolling mill of round bars and by using dilatometric tests was examined the influence of parameters of forming on the temperatures of phase transformations  $Ar_3$  and  $Ar_1$  during free cooling of rolled products of unalloyed low carbon structural steel S235JR. With decreasing of average rolling temperature the temperature  $Ar_3$  was increased, while the size of the total strain, respectively varying degrees of forming rolled products did not have a significant effect on the size of the temperature  $Ar_3$ . In the case of the temperature  $Ar_1$  showed no effect of average temperature rolling on their size. Greater degree of forming rolled products had the effect of reducing the temperature  $Ar_1$ . Based on the evaluation dilatometric test was for the given conditions of heating and cooling rate constructed CCT diagram without and with the influence of the previous deformation. Applications of deformation resulted in the extension of the ferritic area, i.e. the shift of points  $Ar_3$  to higher temperatures and  $Ar_1$  to lower temperatures.

## **Key words**

Laboratory rolling and cooling, dilatometric tests, temperatures of phase transformations, CCT diagram, steel S235JR.

## Obsah

1.	Úvod .....	1
2.	Teoretický rozbor .....	2
2.1	Problematika válcování ocelových tyčí za tepla a jejich následné ochlazování .....	2
2.1.1	Základní charakteristika tyčových vývalků .....	2
2.1.2	Základy kalibrace tyčových vývalků .....	3
2.1.3	Válcovací tratě pro válcování tyčové oceli .....	5
2.1.4	Příklady moderních válcovacích tratí .....	6
2.2	Řízené válcování a ochlazování .....	9
2.2.1	Vývoj mikrostruktury během řízeného válcování .....	11
2.2.2	Řízené ochlazování .....	12
2.2.3	Ochlazování přímých tyčí a tyčí navinutých do svitků .....	13
2.2.4	Proces „Temp-core“ .....	14
2.3	Fázové transformace během ochlazování ocelí .....	14
2.3.1	Difúzní mechanismus přeměny austenitu .....	15
2.3.2	Bezdifúzní mechanismus přeměny austenitu .....	16
2.3.3	Kombinace mechanismu smyku a difúze .....	17
2.4	Transformační diagramy .....	18
2.4.1	Izotermický rozpad austenitu – IRA .....	19
2.4.2	Anizotermický rozpad austenitu – ARA .....	20
2.5	Určování teplot fázových transformací .....	20
2.5.1	Dilatometrická metoda .....	21
2.5.2	Diferenční termická analýza (DTA) .....	21
2.5.3	Metoda měření elektrického odporu .....	22
3.	Cíle práce .....	24
4.	Laboratorní válcování tyčí a dilatometrické testy .....	25
4.1	Popis provedených experimentů .....	25
4.1.1	Válcování na spojitém pořadí polospojité laboratorní válcovny tyčí .....	25
4.1.2	Válcování na předválcovací stolici polospojité laboratorní válcovny tyčí .....	26
4.1.3	Dilatometrické testy na plastometru Gleeble 3800 .....	27
4.2	Použité experimentální zařízení .....	27



4.2.1	Polospojité válcovna tyčí.....	28
4.2.2	Plastometr Gleeble 3800.....	30
5.	Zpracování naměřených dat a analýza ochlazovacích křivek .....	33
5.1	Vyhodnocení naměřených dat z laboratorního válcování.....	33
5.2	Vyhodnocení dilatometrických křivek.....	38
6.	Diskuse výsledků.....	40
7.	Závěr.....	48
	Seznam použité literatury .....	50

## 1. Úvod

Zvyšující se nároky na kvalitu a vybrané mechanicko - plastické vlastnosti materiálů vyžadují využití co nejefektivnějších a optimálních postupů jejich výroby. Zejména v oblasti válcování je v současné době snaha maximálního využití řízeného válcování s ovládáním strukturotvorných procesů a finálních vlastností materiálů. Jedním z nejžádanějších za tepla válcovaných produktů, určených nejen pro automobilový průmysl, jsou tyčové vývalky. Kromě vysokých nároků na kvalitu je nutno klást důraz také na efektivitu jejich výroby. Z tohoto důvodu potřebují velké i menší provozy válcoven různé zkušební a simulační zařízení, díky kterým by se efektivita samotných výrobních procesů neustále posunovala dopředu.

Mezi tyto laboratorní zařízení patří i laboratorní polospojité válcovna tyčí, která je umístěna v areálu VŠB-TU Ostrava. Tato trať byla zprovozněna v roce 2012 a je určena k optimalizačním simulacím podmínek teplotně řízeného válcování a ochlazování především tyčí kruhového průřezu a ke studiu procesů intenzivního tváření za tepla. Všechny tyto zařízení, ať už jde o velké výrobní celky, nebo i malé laboratorní zařízení, musí nejméně v počáteční fázi projít optimalizačními procesy, kterými se odstraní případné problémy a případně se navrhnou nové technologické postupy.

Předložená diplomová práce je zaměřena zkoumání fázových přeměn probíhajících během ochlazování laboratorně válcovaných ocelových tyčí.

## 2. Teoretický rozbor

### 2.1 Problematika válcování ocelových tyčí za tepla a jejich následné ochlazování

Vstupním materiálem proválcování tyčové oceli bývají válcované, neboplynule lité bloky a sochory. Rozměry příčného průřezu se volí podle výrobního programu, doválcovací rychlosti a použitého druhu vsázky. Podle všeobecných zásad musí být minimální stupeň protváření pro běžné oceli 5–8, pro ušlechtilé 8–10 a pro vysokolegované 10–14. Z hlediska výkonnosti tratě, poruchovosti a využití daného kovu se musí volit maximální kusová hmotnost. Děje se tak zvyšováním délky polovýrobku, ten je však omezen dopravními podmínkami a technicko-ekonomickými ukazateli ohřívacích a pomocných agregátů.

Důležitou součástí tvářecích procesů za tepla je i následné ochlazování, které významně ovlivňuje mikrostrukturu a mechanické vlastnosti tvářených výrobků. Nicméně principy a technologie ochlazování se liší v závislosti na tvářecích postupech a požadovaných vlastnostech ocelí. Avšak mnohdy díky optimálnímu nastavení řízeného ochlazování za tepla tvářených výrobků je možno je vyrábět bez použití následného tepelného zpracování [1].

#### 2.1.1 Základní charakteristika tyčových vývalků

Charakteristickým znakem tyčových vývalků je jednoduchý tvar příčného průřezu a převažující rozměr v podélném směru nad rozměrem příčného průřezu.

Tyčové oceli neboli tyčové vývalky patří do skupiny tyčových a tvarových vývalků:

- *Tvarové vývalky* - kolejnice, nosníky tvaru U, I, T, štetovnice, úhelníky (rovnoramenné, nerovnoramenné), aj.
- *Tvarové vývalky na speciální účely* - pružinová, hmatcová, vanová, okenní ajiné.
- *Tyčové vývalky (obr. 1)* - kruhová, čtvercová, či plochá ocel, aj. [2].



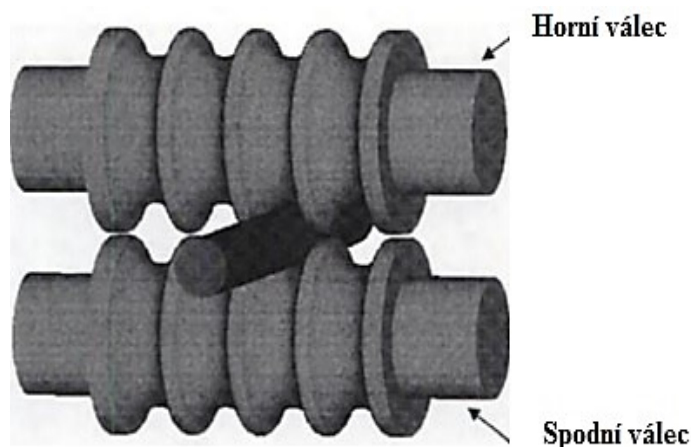
**Obr. 1:** Základní jednoduché tvary příčných průřezů tyčových vývalků [3]

Tyčové vývalky jsou především kruhového průřezu a válcují se v širokém rozpětí průměrů (od 5,5 mm až do 210 mm). Od velikosti 5,5 mm do 20 mm jde o za tepla válcovaný drát. Mezi další tyčové vývalky pak patří ocel čtvercová, trojhranná, šestihranná, aj. [3].

Zvláštní typ oceli představují přímé a navinuté tyče ve svitcích, u kterých se klade větší důraz na kvalitativní parametry včetně časového faktoru, a nazýváme je SBQ (Special Bar Quality). Tato skupina oceli přesahuje rámec průmyslově vyráběných ocelí těmito parametry: úzké rozpětí chemického složení, vysoké požadavky na mikročistotu, zaručená prokalitelnost, mikrostruktura dosažená po řízeném válcování, karbidické síťové a pruhovitost u speciálních ocelí, vysoké požadavky na hladinu oduhličení, povrch vývalku prakticky bez vad, přísné rozměrové tolerance vývalku, přesné délky, přímost vývalků. Dosahování takovýchto parametrů u těchto typu ocelí musí být stabilní opakovatelné a bez odchylek [4].

### 2.1.2 Základy kalibrace tyčových vývalků

Požadovaných změn příčného průřezu válcovaného kovu je dosaženo pomocí zářezů v těle pracovního válce, které tvoří příslušný kalibr (**obr. 2**) a musí dojít k tomu aby provalek vystoupil z kalibrů v přímém směru osy válcování. Při válcování v kalibrech dochází k výrazné nerovnoměrné deformaci po celé šířce kalibru. Optimální stanovení kalibrace válců je jedním z důležitých faktorů při projektování tratí, určených pro válcování tyčových nebo tvarových vývalků [1, 5].

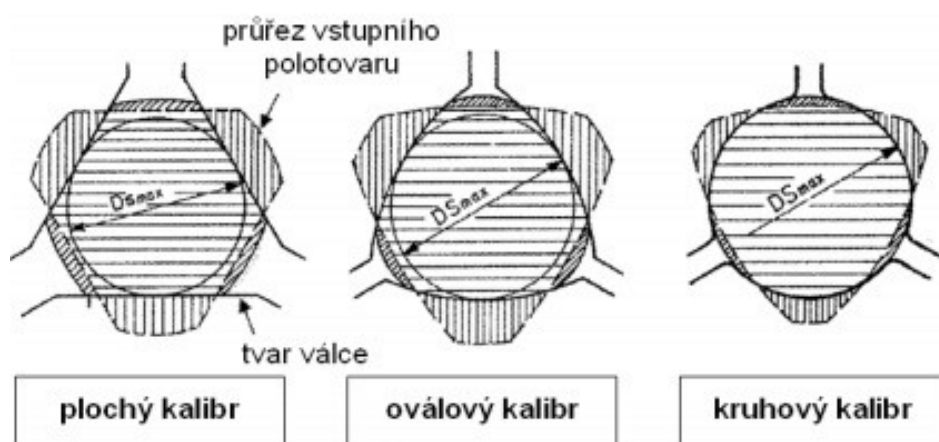


**Obr. 2:** Kalibrované válce [6]

Hlavními požadavky na kalibraci válců je:

- zajistit hladký a čistý povrch vývalku s přesnými tvary, rozměry a v přípustných rozměrových tolerancích;
- zajistit dokonalé protváření průřezu celého vývalku s minimálním vnitřním pnutím;
- minimální spotřeba energie, válců a válcovacího času a docílit optimální výrobnosti válcovací tratě [1].

Pro válcování ocelových tyčí a drátů za tepla se využívají tzv. hotovní bloky, ve kterých je materiál deformován do finálního tvaru tak, aby bylo dosaženo přesného příčného průřezu vývalku, resp. aby bylo dosaženo optimálních rozměrových tolerancí vývalku. Tyto hotovní bloky jsou tvořeny několika stolicemi a jeden kalibr v těchto hotovních blocích tvoří dva (dvou-válcová technologie) nebo tři válce (tří-válcová technologie) – viz **obr. 3**. Hlavní výhodou hotovních bloků využívajících tříválnovou technologii (oproti dvou-válcové technologii) je dosažení menšího šíření materiálu, docílení vyšší efektivity deformace, lepší povrchové jakosti vývalků a menšího opotřebení válců [6].



**Obr. 3:** Typy kalibrů v kotoučových válcích [6]

Kruhová ocel se podle velikosti válcovaného průřezu válcuje na hrubých, středních nebo jemných tratích, přičemž rozsah válcovaného průřezu je limitovaný typem, konstrukcí a uspořádáním stolic a podle toho je pak zvolen optimální typ kalibrace. Pro válcování kruhové oceli se nejčastěji používá kalibrační řada ovál – kruh nebo ovál - pěchovací ovál – kruh. Čtvercová ocel se vyznačuje se přesným tvarem průřezu a ostrými hranami s čistým a hladkým povrchem. Zaoblení rohů je  $r \leq 0,15a$ ). Pro kalibraci čtvercové oceli se nejčastěji

používá soustava kosočtverec – čtverec nebo čtverec – čtverec. Plochou ocelí se rozumí ploché tyče s obdélníkovým příčným průřezem s ostrými hranami [1, 5-7].

### 2.1.3 Válcovací tratě pro válcování tyčové oceli

Vývalky se rozdělují podle metrové hmotnosti a velikosti příčného průřezu na těžké, hrubé, střední a jemné. Válcovací tratě pro válcování tyčové oceli lze rozdělit podle [1]:

- konstrukce válcovacích stolic a počtu válců,
- způsobu otáčení válců,
- uspořádání válcovacích stolic,
- druhu vývalků a průměru pracovních válců.

**Otevřené válcovací tratě** byly složeny z několika válcovacích stolic a byly rozděleny do několika pořadí. Předválcovací pořadí bylo složené z vratných dvou až tří trio nebo duo stolic (průměr válců 400 - 650 mm) Střední pořadí bylo složeno ze tří až čtyř duo nebo trio stolic a hotovní pořadí bylo sestaveno z pěti až sedmi stolic, které byly opět typu duo nebo trio (průměr válců 240 - 380 mm).

**Přesazené válcovací tratě** jsou průběžné tratě a jsou složeny z, duo nebo trio stolic pracujících v několika pořadích, přičemž průměry pracovních válců jsou podobné jako u válců používaných na otevřených tratích.

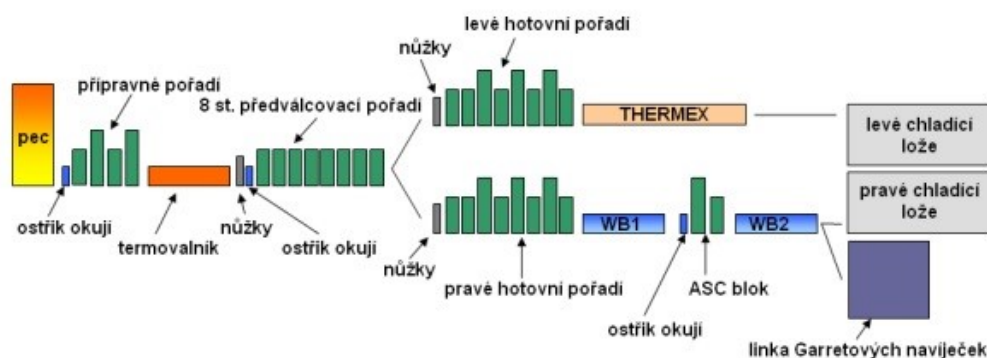
**Polospojité tratě** byly zavedeny kvůli zvyšujícím se nárokům na objem výroby. Tento typ tratí je složen ze dvou až tří pořadí. Bývají uspořádány buď se spojitým předválcovacím a středním pořadím, přičemž doválcovací pořadí bylo v otevřeném uspořádání, nebo bývají konstruovány s předválcovacím pořadím v otevřeném uspořádání a doválcovacím pořadím se spojitým uspořádáním.

K válcování tyčí za tepla se v dnešní době používají především **spojité tratě**, které se vyznačují vysokou výrobností. Tyto tratě mohou být rozděleny do několika pořadí – předválcovací, střední a hotovní. Osová vzdálenost válcovacích stolic v jednom pořadí je kratší než délka materiálu, a proto je válcovaný materiál současně ve všech stolicích daného pořadí. V důsledku toho se zvyšují nároky na synchronizaci válcovacích rychlostí jednotlivých stolic [1, 2].

### 2.1.4 Příklady moderních válcovacích tratí

Všude na světě dochází k neustálým modernizacím tratí, proto aby bylo dosaženo co největší výrobní kapacity s co nejnižšími investičními náklady.

**Kontijemná trať v Třineckých železárnách a.s.** byla postavena v roce 1960 a v letech 2003 až 2008 prošla rozsáhlou modernizací. Díky těmto modernizacím se umožnilo válcovat oceli SBQ (Special Bars Quality) a ty dodávat odběratelům v tyčích anebo navinuté do svitků. Tyče mají přesnou geometrii, vysokou povrchovou a vnitřní jakost s požadovanými mikrostrukturními a mechanickými vlastnostmi. Do této skupiny se řadí oceli konstrukční, středně a vysoce legované, mikrolegované, ložiskové, pružinové, šroubářenské, atd. Rekonstrukce a modernizace válcovací tratě umožnily orientovat podstatnou část výroby zatepla válcovaných tyčí na dodávky pro automobilový průmysl. Díky těmto modernizacím se tato trať (viz **obr. 4**) řadí mezi nejmodernější spojitě tratě pro válcování tyčové oceli [8].



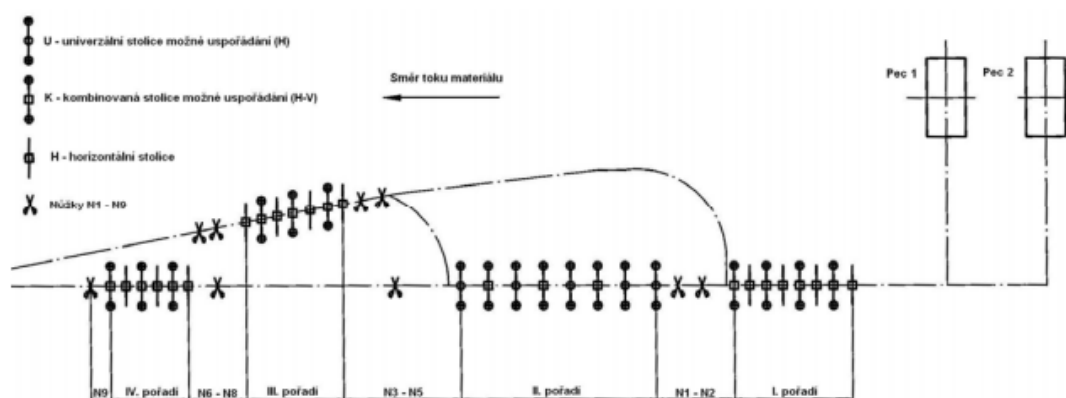
**Obr. 4:** Schéma kontijemné trati v TŽ a.s. [9]

Vstupním materiálem pro válcování tyčové oceli jsou plynule lité polotovary nebo válcované sochory o rozměru kvadrát 150 mm a délky 12 m o hmotnosti cca 2 t. Výrobní kapacita tratě je 550 kt/rok. Na trati je možno praktikovat řízené válcování a ochlazování tyčí. Mezi hlavní výrobní sortiment této tratě patří přímé tyče (kruhová ocel o průměru 16 – 80 mm, šestihranná ocel o průřezu 16 – 48 mm, plochá ocel o průřezu od 25 x 5 do 50 x 10 mm, oblinová ocel, rovnoramenné úhelníky o průřezu od 30 x 30 x 3 do 50 x 50 x 6 mm, betonářská žebírková ocel o průměru 10 – 32 mm) a tyče navinuté do svitků (kruhová ocel o průměru 16 – 50 mm, šestihranná ocel o průřezu 16 – 38 mm) [10].

Na **středojemné válcovací trati společnosti ArcelorMittal Ostrava, a.s.** se válcuje široký rozsah tyčové oceli a také tvarové oceli. Výrobní program středojemné válcovny se skládá z kruhových tyčí ( $d = 10 - 65$  mm), šestihranných tyčí, plochých tyčí (šířka 20 – 120 mm, tloušťka 4 - 50 mm), betonářských ocelí ( $d = 10 - 39$  mm), rovnoramenných

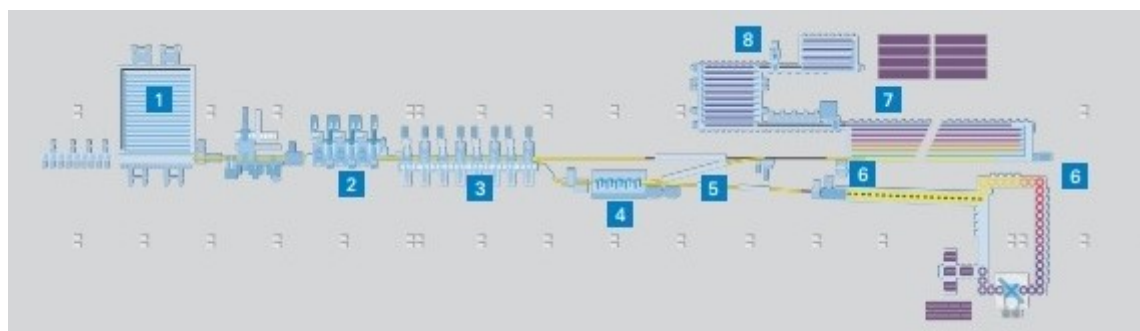
úhelníků (šířka ramen 38 x 38 - 90 x 90, tloušťka 4 –13 mm) a ze středních a jemných profilových vývalků IPE, IPEA, I, U, UE.

Středojemnou válcovací trať (viz **obr. 5**) tvoří 4 samostatná spojitá pořadí, která lze různě zapojovat do válcovacího procesu. U prvního a druhého pořadí je možno válcovat při přestavbě kombinovaných stolic na horizontální dvoužilově z nápichu kvadrátu 115 mm. Mezi jednotlivými pořadími jsou uloženy letmé nůžky, pomocí kterých dochází k odstříhávání předních a zadních konců, případně slouží k sešrotování vývalku při poruše [2].



**Obr. 5:** Schéma středojemné tratě, ArcelorMittal Ostrava, a.s [2]

**Válcovna tyčí společnosti T. D. C. Steel Group Co. Ltd** (viz **obr. 6**) ideálně kombinuje omezené investiční náklady a jednoduchost s vysokou produktivitou, což představuje řešení zaručující nejrychlejší návratnost investic. Tato válcovna je dimenzována pro středně velkou výrobu s dosahem až 500000 tun ročně. Typické průměry výrobků se pohybují od 8 do 32 mm a patří mezi ně kruhové a betonářské oceli [11].

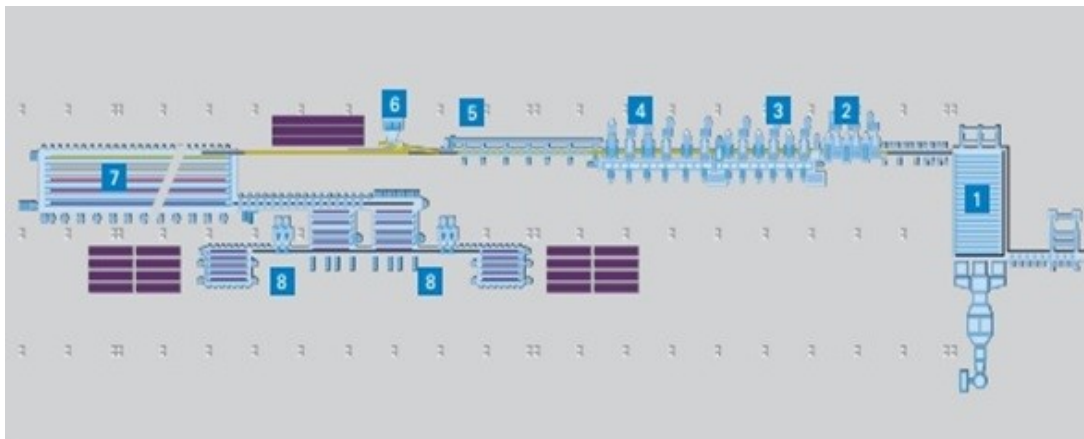


**Obr. 6:** Schéma jednožilové vysokorychlostní válcovny tyčí [11]

(1. pec, 2. předválcovací pořadí, 3. střední pořadí, 4. hotovní pořadí, 5. kalení a samovolné popouštění, 6. systém HSD, 7. chladicí lože, 8. konečné úpravy)



**Válcovna tyčí Hamriyah steel** (viz obr. 7) se zaměřuje především na výrobu betonářské oceli s využitím technologie slit-rolling. Válcovací trať je rozdělena do několika pořadí a válcuje ve 2 až 4 žilách.



**Obr. 7:** Schéma válcovny tyčí Hamriyah steel [11]

(1. pec, 2. předválcovací pořadí, 3. střední pořadí, 4. hotovní pořadí, 5. kalení a samovolné popouštění, 6. rovnací linka, 7. chladicí lože, 8. konečné úpravy)

Mnoho výrobců betonářské (žebříkové) oceli provozuje válcovny využívající technologii slit-rolling, který umožňuje využití plné kapacity tratě při válcování tyčí malých průměrů v rozmezí od 10 nebo 12 až 40 mm. I v případě, že konstrukční rychlost válcoven může být vyšší, pohybují se válcovací rychlosti v rozmezích 13 až 18 m·s<sup>-1</sup>. Důvodem těchto nízkých rychlostí je dosažení přesných rozměrových vlastností malých průměrů tyčí. Nastavení válců pro válcování těchto malých rozměrů vyžaduje velké přesnosti. Kromě vysoké produkce procesu, má proces i tyto výhody:

- Pro určité průměry se mohou volit vstupní polotovary o větším průřezu, nebo použít méně válcovacích stolic, čímž dojde k redukci pořizovacích nákladů nových tratí,
- u malých průměrů jdou volit větší vstupní válcovací rychlosti, které kladně ovlivňují teplotního pole rozvalku a zlepšují tím životnost válců.

U tohoto procesu jsou využívány speciální kalibry a válcovací armatury, které slouží k podélnému dělení do dvou nebo více žil. Toto válcování musí být velice přesné, aby se dosáhlo před poslední válcovací stolicí potřebného tvaru vývalku „psí kosti“ a došlo k jeho rozdělení [11, 12].

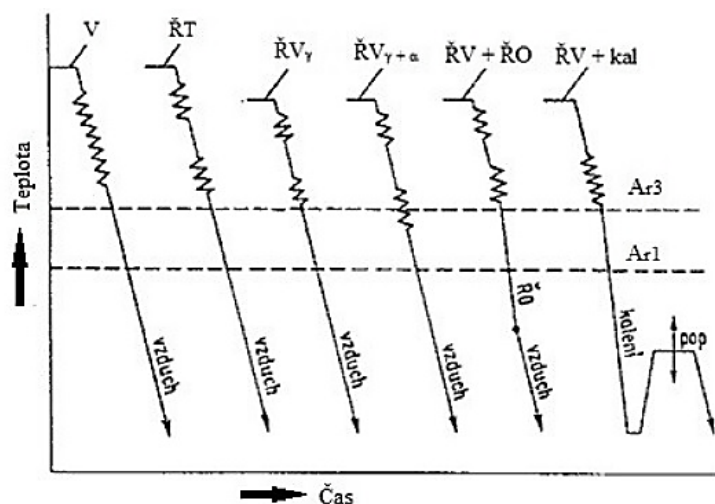
**Válcovna společnosti Vinyak Rathi steel** produkuje termomechanicky zpracované tyče s roční kapacitou 150000 tun ročně. Plně automatizované zařízení je vybaveno nejmodernějšími technologiemi. Válcovnu tvoří 14 válcovacích stolic s výrobní rychlostí  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a složitější technické vybavení systému pro výrobu dobré kvality termomechanicky upravených tyčí. Linka je plně automatizována a lze naní vyrábět termomechanicky zpracované tyče od průměrů 8 mm do 32 mm. Výhodou těchto tyčí je vysoká pevnost, tažnost, vynikající ohebnost, odolnost proti korozi a výborná svařitelnost [13].

## 2.2 Řízené válcování a ochlazování

Řízeným válcováním a následným řízeným ochlazováním chceme dosáhnout nejen požadovaného tvaru vývalku, ale i požadovaného strukturního stavu a tím pádem i požadovaných mechanických vlastností. Tohoto stavu se dosáhne řízením celkových výrobních podmínek, mezi které se řadí teplota válcování, velikost deformace, deformační rychlost, časové prodlevy ochlazování. Vysoké pevnostní vlastnosti jsou dosaženy legováním a tepelným zpracováním, ale tento výrobní postup je nákladný, a proto se postupně vyvinuly různé méně nákladné způsoby termomechanického válcování. Cílem tohoto řízeného válcování je dosažení požadované mikrostruktury, ke které patří i mechanické vlastnosti materiálu. Zásadní význam z hlediska strukturního stavu má velikost zrn a subzrn, podíl jednotlivých strukturních složek, množství precipitátů, hustota dislokací a stavba tuhého roztoku. Také mikrolegující prvky v oceli mají velký význam, protože brání hrubnutí zrna při ohřevu, brzdí rekristalizaci při doválcování a precipitačně zpevňují ocel [14-17].

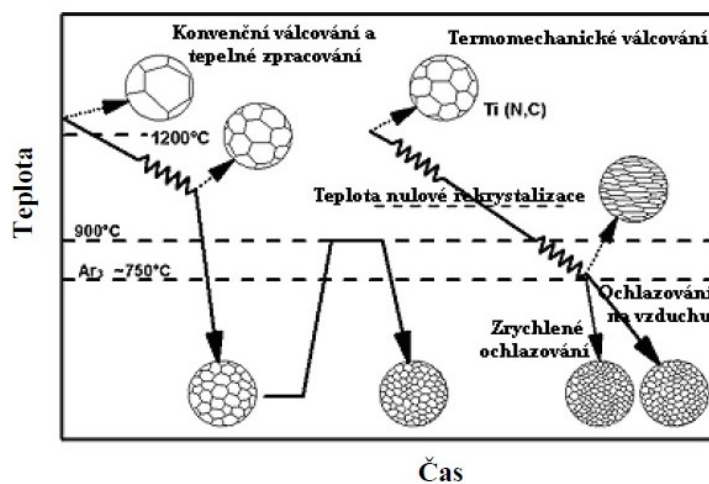
Základními druhy řízeného válcování jsou (viz **obr. 8**):

- ŘV $\gamma$  - doválcování ve spodní oblasti austenitu (dvou- nebo třístupňové),
- ŘV $\gamma + \alpha$  - doválcování v oblasti dvoufázové struktury,
- ŘV + ŘO - doválcování ve spodní oblasti austenitu (dvou- nebo třístupňové) + řízené ochlazování,
- ŘV + kal - řízené válcování s kalením a popouštěním.



**Obr. 8:** Základní druhy řízeného válcování v závislosti teplota - čas [15]  
 V - konvenční válcování; ŘT - válcování s řízenými teplotami;  
 ŘV - řízené válcování; ŘO - řízené ochlazování;  
 kal - kalení; pop - popouštění

Vysoké pevnosti při dobré houževnatosti se dosáhne konvenčním válcováním apoté tepelným zpracováním. Tento způsob výroby ale není ekonomicky výhodný a proto byly vyvinuty jiné, méně nákladné způsoby termomechanického zpracování ocelí. Na **obr. 9** lze vidět porovnání těchto dvou zmiňovaných procesů [18].



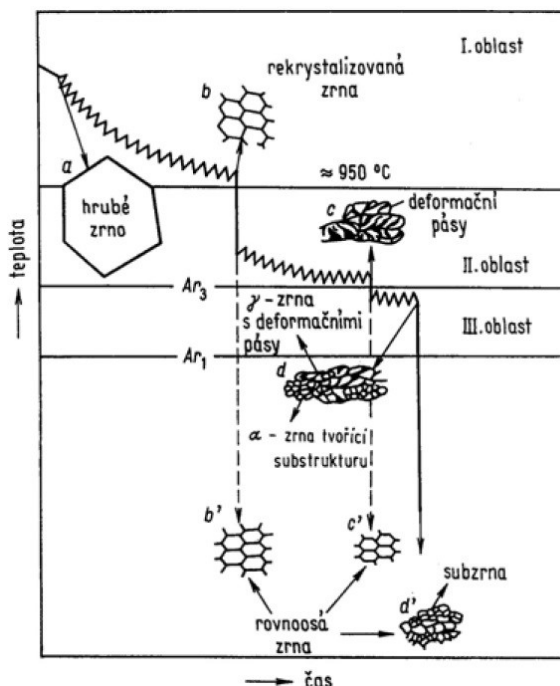
**Obr. 9:** Porovnání termomechanického a konvenčního válcování s následným tepelným zpracováním [18]

### 2.2.1 Vývoj mikrostruktury během řízeného válcování

Vliv teploty válcování na vývoj struktury za tepla tvářeného materiálu přehledně dokumentuje **obr. 10**. V první oblasti dochází ke zjemnění původního hrubého austenitu účinkem opakované deformace a rekrytalizace. Zárodky pro přeměnu  $\gamma \rightarrow \alpha$  jsou vytvářeny pouze na hranicích austenitických zrn. Výsledná velikost feritického zrna je ještě poměrně hrubá a další snížení cyklem deformace - rekrytalizace v této oblasti již není možné. Po přeměně vznikne poměrně hrubé feritické zrna.

V druhé oblasti dochází ke vzniku deformačních pásů v objemu protažených nerekrystalizovaných austenitických zrn, které vzniknou následkem zbrzděné rekrytalizace. Ferit pak nukleuje jak v deformačních pásích, tak na hranicích zrn austenitu a konečným účinkem je pak zjemnění mikrostruktury. Při transformaci austenitu na ferit plní deformační pásy stejnou roli jako hranice zrn, tedy jsou nukleačními místy pro feritická zrna. Deformační pásy rozdělují deformovaná austenitická zrna do bloků.

V poslední oblasti se uskutečňuje další zjemnění. Ke zjemnění dochází tvářením ve dvoufázové oblasti. Feritické zrna deformované po přeměně  $\gamma \rightarrow \alpha$  již nemůže dále rekrytalizovat, a při probíhající zotavení vznikají subzrna. Konečný stav mikrostruktury je složen z rovnoměrných feritických zrn a z protažených feritických zrn, se specifickou substrukturou [7, 19].



**Obr. 10:** Základní stádia řízeného válcování [7]

(I. oblast rekrytalizace, II. oblast bez rekrytalizace, III. oblast austeniticko-feritická)

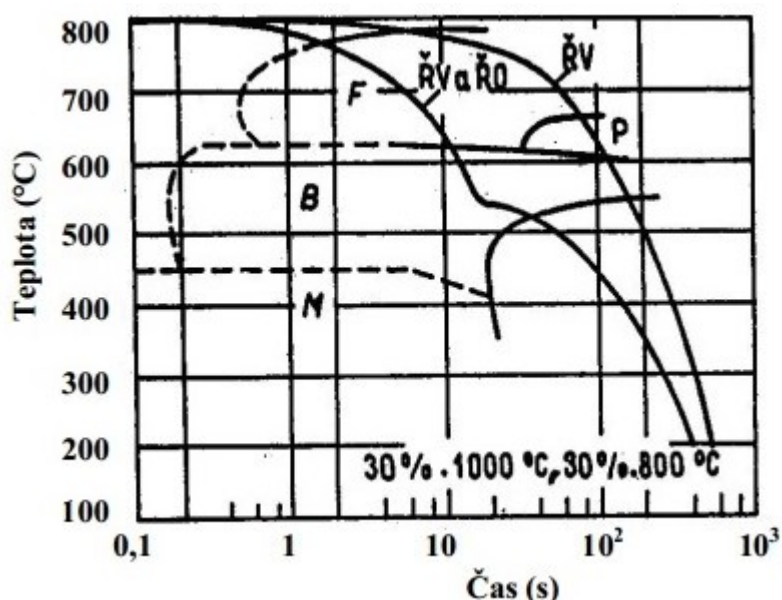
### 2.2.2 Řízené ochlazování

Aby došlo k ochlazení materiálu těsně nad teplotu  $A_{r3}$  je bezprostředně před doválcovacím pořadím situováno chladicí zařízení. Na konci výrobní linky bývá umístěno ještě jedno chladicí zařízení, kterým se dosáhne rovnoměrného a rychlého ochlazení vývalku pod teplotu  $A_{r1}$ . Řízené válcování je účinné pouze do průřezu cca 40mm, protože u větších rozměrů nedojde k intenzivnímu ochlazení středních vrstev z důvodu vysoké teplotní setrvačnosti. Cílem řízeného ochlazování je tedy dosažení jemnozrné homogenní struktury bez ovlivnění přímosti vývalků.

Řízeným ochlazováním po válcování lze dosáhnout:

- zjemnění feritického zrna,
- zjemnění perlitu nebo bainitu,
- zvýšení doválcovacích teplot,
- zlepšení svařitelnosti snížením uhlíkového ekvivalentu Ce.

Protože plastická deformace ovlivňuje teplotu a kinetiku přeměn, je nutná znalost ARDiagramu po předchozí deformaci. Rozhodující vliv pro získání konečné struktury má rychlost ochlazování **obr. 11** během fázových přeměn a tzv. stop teplota ( $T_{stop}$ ), při níž je zrychlené ochlazování přerušeno [1, 7].



**Obr. 11:** Vliv ochlazovací rychlosti na strukturu[7]

Pro C-Mn-Nb-V oceli se volí optimální stop teplota okolo 550 °C, díky které nedojde k velkému zakalení struktury. Strukturu pak tvoří jemná feritická zrna s rovnoměrně

rozptýlenými ostrůvky bainitu. Pouze řízeným válcováním lze dosáhnout jemně feriticko-perlitické struktury s texturním uspořádáním. Při řízeném ochlazování se zjemní feritické zrno, zlepší se morfologie sekundární fáze a dojde ke zvýšení pevnosti [7, 19].

### 2.2.3 Ochlazování přímých tyčí a tyčí navinutých do svitků

Za tepla válcované tyče lze odběratelům dodávat ve formě přímých tyčí nebo je lze za tepla navinovat do svitků. Z toho je patrné, že podmínky ochlazování přímých tyčí a tyčí navinutých do svitků jsou rozdílné.

K ochlazování za tepla válcovaných přímých tyčí se v současné době používají chladicí lože, kde tyto tyče volně chladnou na vzduchu nebo jsou pomocí vzduchových ventilátorů zrychleně ochlazovány – viz **obr. 12**. Tyče se na chladníku většinou vzájemně nedotýkají a tím pádem je zajištěno rovnoměrné ochlazování po jejich celém průřezu a délce. S použitím speciálních chladicích boxů, ve kterých proudí voda, lze vyvácované tyče zrychleně ochlazovat zvolenou rychlostí na danou teplotu. Poté tyto tyče opět chladnou na chladicím loži [1, 20].



**Obr. 12:** Ochlazování tyčové oceli na chladicí loži v TŽ [21]

Pro navinutí za tepla vyvácovaných tyčí do svitků lze využít Garretovy navíječky, kterými je vybavena například kontijemná trať v TŽ a.s. Toto zařízení umožňuje svinování především kruhové oceli v průměrech od 15 mm do 50 mm. Po navinutí (**obr. 13**) je svitek přemístěn na paletu a je ochlazován buď volně na vzduchu, anebo může být podroben technologii zrychleného ochlazování, které zajišťuje 6 ventilátorů. Další možností je svitky zpomaleně ochlazovat ve dvou izolovaných tunelech s celkovou kapacitou 24 svitků [2].



**Obr. 13:** Svitky po vytažení z Garrettových navíječek v TŽ a.s. [22]

Rychlosti ochlazování přímých tyčí a tyčí navinutých do svitků jsou tedy značně rozdílné. V za tepla navinutém svitku je nahromaděno mnohem větší množství tepla, než je tomu u tyče stejné jakosti ochlazované na chladícím loži. Odvod tepla je v případě svitku nerovnoměrnější (ve srovnání s přímými tyčemi) a tím pádem mohou vznikat jisté rozdíly v mikrostruktuře navinuté tyče [1, 2].

#### **2.2.4 Proces „Temp-core“**

Zvláštní způsob řízeného ochlazování představuje proces „Temp-core“, který je běžně používán při výrobě betonářských ocelí. Mimo jiné ho lze využít i při válcování tyčových ocelí, které se dále nezpracovávají obráběním a kde není kladen důraz na vyšší mechanické hodnoty. Tento typ válcování je kombinací konvenčního válcování a řízeného intenzivního vodního chlazení, ke kterému dochází průchodem žhavého vývalku vodním boxem, ve kterém je regulován tlak a množství vody. Toto intenzivní chlazení probíhá od povrchu do středu vývalku. Po tomto chlazení je teplota povrchu materiálu na úrovni teploty chladicí vody (až 40 °C) a střed vývalku má teplotu cca 1050 °C. Nakonec dojde k vyrovnání teplotního rozdílu mezi středem a povrchem vývalku volně na vzduchu.

Po průřezu vývalku je pak výchozí struktura vícefázová, a obvod řezu vývalku je tvořen martenziticko-sorbitickou strukturou, která směrem do středu vývalku přechází přes bainitickou vrstvu do středové oblasti tvořené feriticko-perlitickou strukturou [23].

### **2.3 Fázové transformace během ochlazování ocelí**

Fázové transformace, ke kterým dochází při tuhnutí, se vyskytují při odlévání a tuhnutí oceli, ale fázové přeměny, které probíhají v tuhém stavu, jsou zapříčiněny změnou struktury, a tím i změnou určitých vlastností oceli. K přeměnám dochází zezáčátku v malých

objemech, kdy dochází k tvorbě zárodků nové fáze (nukleace), které pak dále rostou na úkor původní fáze. K těmto dějům dochází buď difúzními, nebo bezdifúzními pochody. U tohoto procesu, kde dochází k tvorbě zárodků pro vytvoření nové fáze, je potřeba určitého času, který nazýváme tzv. Inkubační dobou.

V důsledku polymorfie dochází při ochlazování k přeměně kubické plošně centrované mřížky v mřížku kubickou prostorově centrovanou. U přeměny dochází k výrazné objemové změně, způsobené větší hustotou uspořádání atomů v mřížce  $\gamma$  než v mřížce  $\alpha$ . Když je přítomen uhlík, je nejvýraznějším projevem přeměny zásadní změna v jeho rozložení. Intersticiální uhlík se v austenitu rozpouští ve velkém rozsahu a ve feritu je za rovnovážných podmínek jeho rozpustnost nepatrná. Velikost teploty, u které přeměna austenitu probíhá, je rozhodující pro zajištění účinného rozsahu difúze v průběhu přeměny. Kromě toho teplota má vliv také na průběh přeměny a výsledné produkty. U přeměn austenitu při větším přechlazení vznikají z kinetických důvodů fáze a struktury termodynamicky méně výhodné, než je feriticko-perlitická směs.

Ochlazováním austenitu dochází ke vzniku nové nízkoteplotní fáze nebo strukturních složek typu ferit, perlit, bainit a martenzit, případně cementit (nadeutektoidní ocel). Tyto fáze, respektive strukturní složky se od sebe liší jak vlastnostmi, tak i řídicími mechanismy vzniku, které lze rozdělit na 3 základní [24, 25].

### **2.3.1 Difúzní mechanismus přeměny austenitu**

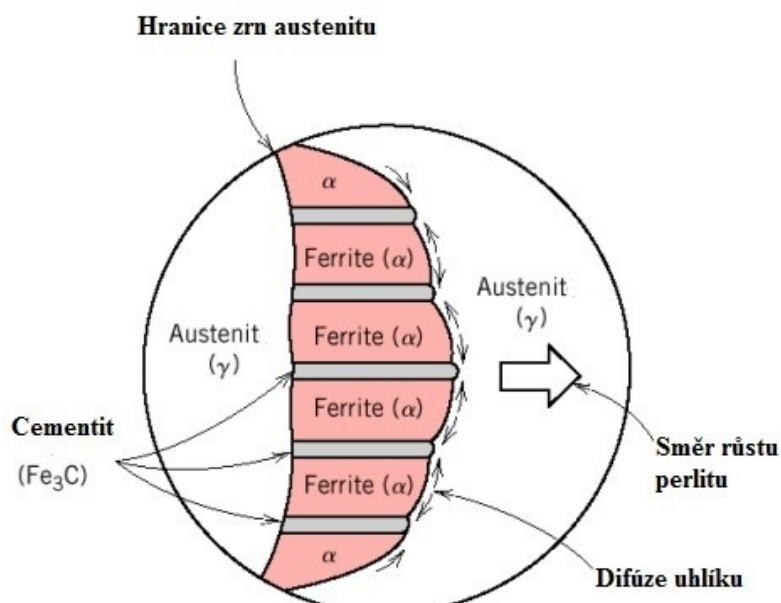
Tímto mechanismem je řízen vznik perlitu i feritu, popřípadě cementitu. Při pomalém a středně pomalém ochlazování podeutektoidní oceli dochází podkročením teploty  $A_{r3}$  k tvorbě feritu. U nadeutektoidních ocelí vzniká cementit podchlazením austenitu pod teplotu  $A_{r_m}$ . Tyto dvě přeměny mají charakter rozpadu přesyceného tuhého roztoku a podkročením teploty  $A_{r1}$  jsou následovány vznikem perlitické přeměny.

Ke vzniku feritu dochází vylučováním na hranicích austenitických zrn, protože tam jsou nejpříznivější nukleační podmínky. Atomy uhlíku difundují z oblastí tvořícího se feritu směrem do středu austenitického zrna, které je postupně obohacováno uhlíkem, a v souladu s rovnovážnými podmínkami tak zachovává svou stabilitu s klesající teplotou. Podobný průběh, můžeme očekávat i u vylučování cementitu u nadeutektoidních ocelí.

Přeměna perlitu z austenitu začíná vznikem zárodku  $Fe_3C$  nebo feritu, který nukleuje přednostně na hranici austenitického zrna. K přeměně dochází začátkem nukleace cementitu (podle teorie Hulla a Mehla). K jejich růstu dochází pomocí atomu uhlíku, který difunduje mřížkou austenitu na zárodky cementitu. Dojde k tomu, že cementit podnítí krystalizaci feritu



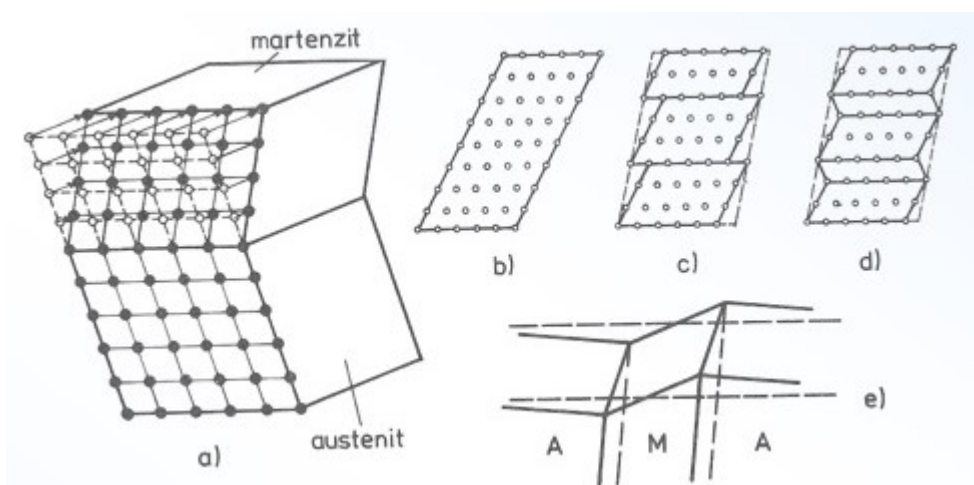
v přilehlých oblastech austenitu ochuzených uhlíkem. Protože ferit rozpouští minimální množství uhlíku, difundují jeho atomy do sousedních oblastí austenitu, kde dojde k přesycení a vyloučení cementitu z této oblasti. K ději dochází střídavou tvorbou cementitu a feritu, čímž se vytváří lamelární perlit (viz **obr. 14**) [24, 26, 27].



**Obr. 14:** Schématické znázornění přeměny austenitu na perlit [28]

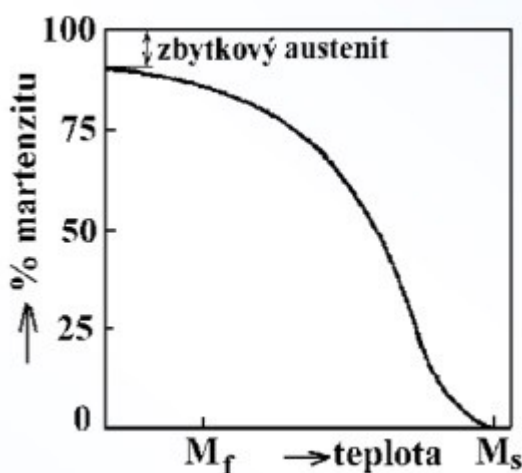
### 2.3.2 Bezdifúzní mechanismus přeměny austenitu

Transformace může probíhat také smykem, což platí například pro vznik martenzitu. Probíhá při výrazném přechlazení austenitu, kdy nedojde k difúzi nejen substitučních prvků, ale ani k difúzi uhlíku a austenit se přemění smykovým mechanismem na martenzit **obr. 15** [25].



**Obr. 15:** Mechanismus martenzitické přeměny [29]

Martenzit lze definovat jako přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ , vzniklý smykovým mechanismem. Přesycení mřížky způsobuje její deformaci, a proto se mřížka změní z kubické prostorově centrované na mřížku tetragonální prostorově centrovanou. K martenzitické přeměně dojde ihned po dosažení teploty  $M_s$  - **obr. 16**. U této přeměny není potřeba inkubační periody.



**Obr. 16:** Průběh martenzitické přeměny v závislosti na teplotě [27]

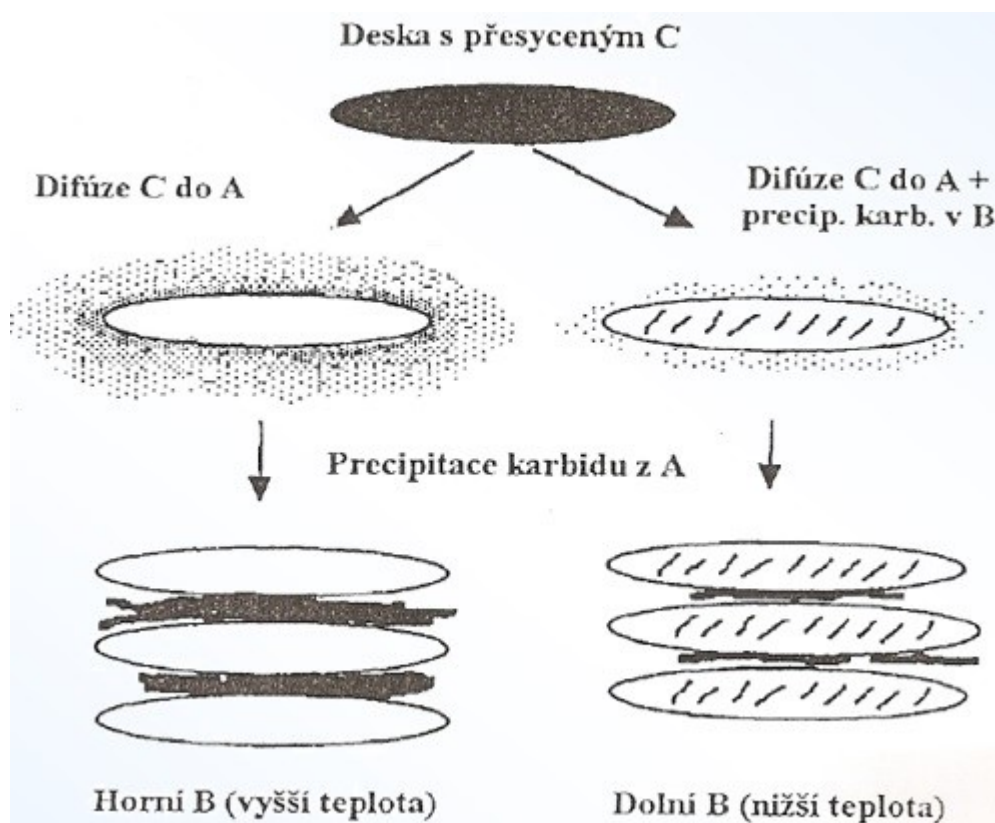
Ke vzniku martenzitu dochází při uspořádaných přesunech skupin atomů z uzlových bodů původní fáze do uzlů mřížky nové fáze tak, že relativní změny poloh sousedních atomů jsou menší než parametr mřížky.

V závislosti na obsahu uhlíku se tvoří ve struktuře martenzitu jehlice nebo desky. Kinetika této přeměny závisí především na nukleačních pochodech, protože k růstu martenzitu dochází velice rychle a blíží se rychlosti zvuku v daném prostředí (až  $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Každá jehlice (deska) martenzitu dosahuje velmi rychle mezního rozměru, který je ovlivněn především velikostí austenitického zrna. Martenzit může být v závislosti na obsahu uhlíku velice tvrdý, ale i křehký, což je způsobeno vnitřním pnutím a zpevňujícími mechanismy [25, 27, 30].

### 2.3.3 Kombinace mechanismu smyku a difúze

Představitelem poslední varianty přeměny austenitu je bainit, který vzniká při středně velké rychlosti ochlazování. Vznik bainitu je spojen s existencí inkubační periody, takže nedochází k němu okamžitě. Při stejném obsahu uhlíku má bainit vyšší pevnost i tvrdost než perlit. Bainitická přeměna je ze všech přeměn nejsložitější a je závislá na obsahu uhlíku a slitinových prvků. Morfologie bainitické struktury dané oceli závisí na teplotě přeměny a

hlavně na rychlosti ochlazování přes bainitickou oblast. Rozlišuje se horní a dolní bainit, někdy se lze setkat i se středním bainitem. Vznik horního a dolního bainitu zobrazen na **obr. 17**. Při vyšších teplotách dochází ke vzniku horního bainitu, a při nižších teplotách k dolnímu bainitu [25, 27, 30].



**Obr. 17:** Schéma vzniku horního bainitu a spodního bainitu [31]

## 2.4 Transformační diagramy

Znázorňují průběh přeměn přechlazeného austenitu a dávají informace o tom, jak jednotlivé přeměny závisí na teplotě a času [31]. Transformační diagramy platí pro určitou ocel a pro dané podmínky austenitizace. Znázorňují začátek a konec jednotlivých druhů přeměn austenitu a rozdělují se do těchto dvou základních skupin:

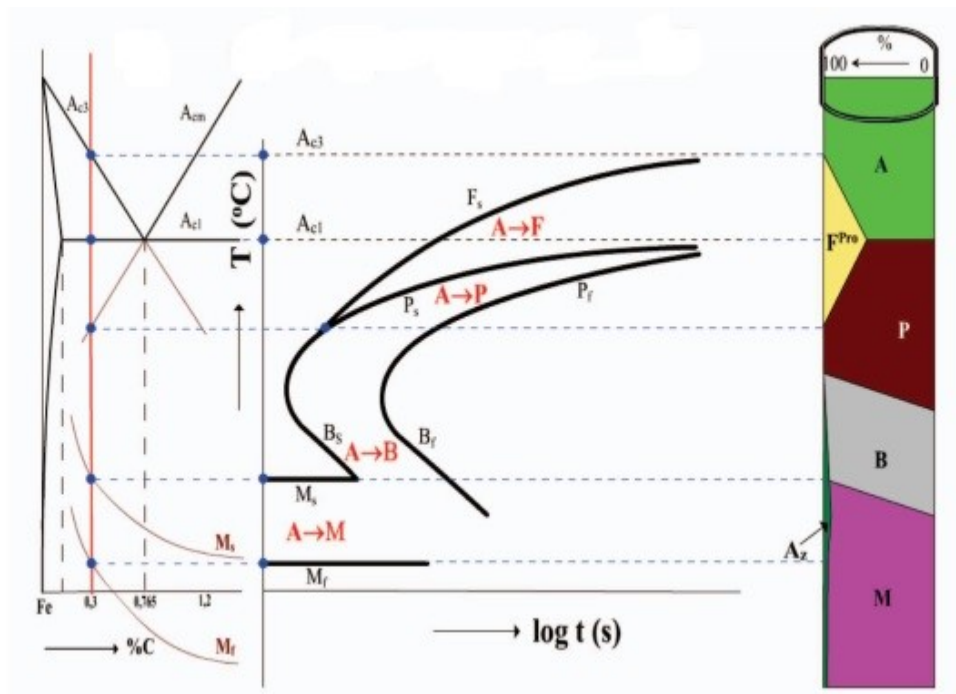
- Diagramy izotermického rozpadu austenitu - IRA.
- Diagramy anizotermického rozpadu austenitu – ARA [32, 33].

Tyto transformační diagramy mají obrovský praktický význam. Jsou důležitým podkladem při optimalizaci postupu tepelného zpracování, díky nim lze účelně volit druh oceli pro dané podmínky provozního namáhání a dokonaleji využívat vlastností dané oceli. Diagramy IRA mají význam především pro izotermické pochody, kdežto diagramy ARA jsou

uplatňovány ve větším rozsahu, neboť při většině postupů tepelného zpracování austenit transformuje při plynulém ochlazování [30].

#### 2.4.1 Izotermický rozpad austenitu – IRA

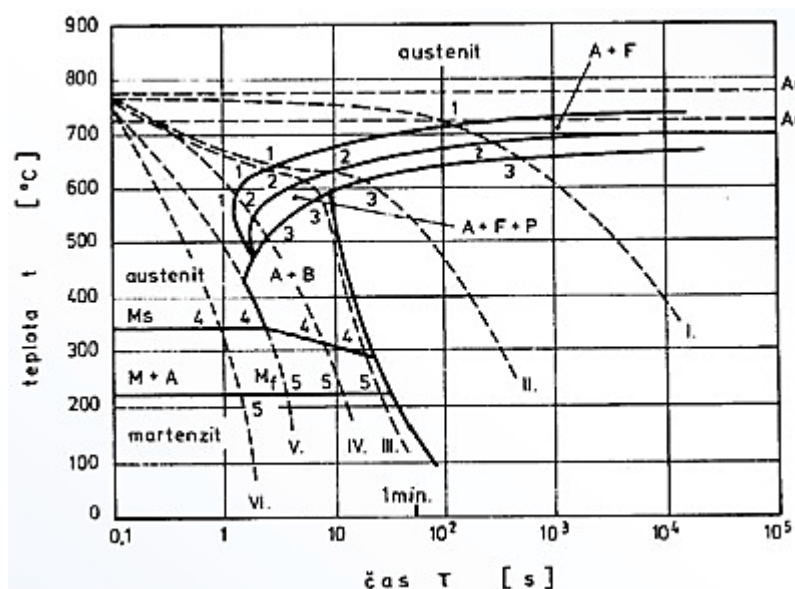
Tyto diagramy znázorňují charakter přeměny austenitu během ochlazování na ferit (oblast pod teplotou  $A_{r3}$ ), perlit (oblast teplot pod  $A_{r1}$ ), bainit (oblast středních teplot) a martenzit (nejnižší teploty) při konstantní teplotě. Na **obr. 18** je znázorněn diagram IRA podeutektoidní oceli. Ke konstrukci diagramu dochází tak, že vzorek oceli je přenesen z oblasti stabilního austenitu do prostředí s teplotou, při které má dojít k izotermickému rozpadu austenitu. Před zakalením strukturu tvoří austenit a po zakalení dojde k přeměně austenitu na martenzit. Tvar a polohu křivek ovlivňují veškeré faktory, které mají vliv na průběh perlitické, bainitické a martenzitické přeměny. Kromě těchto faktorů ovlivňuje tvar a polohu křivek ještě chemické složení oceli, homogenita austenitu a velikost jeho zrna. Jak roste velikost zrna, tak dochází k prodloužení inkubační doby perlitické reakce a diagram se posouvá více doprava. K posunutí diagramu směrem doleva dochází při jemném austenitickém zrně, chemické nehomogenitě a vměstcích v austenitu jako jsou (karbidy Mn, Cr, W, Mo, V, Zr, Nb, Ta, Ti a nečistoty) [30, 32].



**Obr. 18:** Příklad IRA diagramu pro podeutektoidní ocel [34]

### 2.4.2 Anizotermický rozpad austenitu – ARA

Na rozdíl od diagramu IRA, kde dochází k rozpadu austenitu při konstantní teplotě, mají diagramy ARA určeny pro mnohem širší užití. Pomocí ARA diagramů (viz **obr. 19**) se posuzují všechny pochody tepelného zpracování, kdy přeměna austenitu probíhá při plynulém ochlazování. Mají větší význam v praxi, protože znázorňují začátky a konce jednotlivých přeměn a výsledné struktury při různých rychlostech ochlazování. Na tvar jednotlivých křivek má vliv chemické složení, velikost zrna, velikost austenitizační teploty a doba výdrže na austenitizační teplotě. V diagramu jsou znázorněny začátky a konce jednotlivých přeměn jako je feritická, perlitická, martenzitická a bainitická. K přeměně dochází během ochlazování, kdy teplota klesne pod  $Ar_3$ , dochází k tvorbě feritu. Při dosažení teploty  $Ar_1$  začíná perlitická přeměna, potom následuje přeměna austenitu na bainit a martenzit [30, 32].



**Obr. 19:** Příklad ARA diagramu podeutektoidní oceli [30]

### 2.5 Určování teplot fázových transformací

Přeměny, které probíhají v kovech, jsou rozděleny buď na změny skupenství tj. kapalně-tuhé nebo naopak a potom na přeměny v tuhém stavu. K přeměnám v tuhém stavu dochází přestavbou krystalické struktury a bývají doprovázeny změnami fyzikálních a mechanických vlastností látek. Například dochází ke změnám rozměrů, se kterými jsou spojeny jejich specifické hmotnosti, dále pak ke změnám pevnosti, tvrdosti, magnetických a elektrických vlastností. Metody studia fázových přeměn jsou nepřímé.

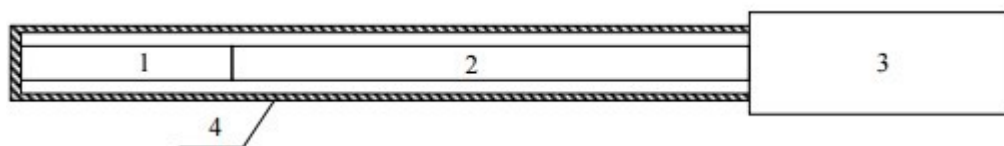
Kromě určení teplot fázových transformací se ještě určují i časy, kdy k těmto přeměnám dochází. K sestavování rozpadových diagramů při výrazných změnách fyzikálních

vlastností lze využít termickou analýzu, kalorimetrickou metodu, rezistometrickou metodu, dilatometrii, magnetometrii a difrakční RTG analýzu. Kromě těchto fyzikálních metod lze využít i numerické výpočty a matematické simulace ve speciálních k tomu určených softwarech [24, 35].

### 2.5.1 Dilatometrická metoda

Dilatometrická metoda je založena na měření rozměrových změn zkoumaného vzorku, ke kterým dochází přeskupováním atomů při působení zvoleného teplotního režimu (při ohřevu nebo při ochlazování). Změna strukturní fáze například při ochlazování je doprovázena velmi malou změnou rozměru zkoumaného vzorku. Slouží k měření změny délky nebo průměru zkoušeného vzorku. Dilatometrie také umožňuje sledovat průběh izotermické přeměny za zvýšené konstantní teploty. Dilatometry mohou být podle způsobu použití velmi rozmanitého původu. Základní dilatometr (viz **obr. 20**) je složen z jednostranně uzavřené trubice a tyče, která přenáší změnu rozměru vzorku do převodníku. Trubice i přenosová tyč jsou vyrobeny ze stejného materiálu s minimální teplotní roztažností, který musí odolávat teplotám požadovaným pro měření daného vzorku.

Při teplotách pod 1000 °C se nejčastěji používá křemenné sklo, které má teplotní roztažnost řádově  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Pro teploty v rozmezí 1000 až 1700 °C je vhodná keramika. Jako preferovaný materiál je vysoce čistý sintrovaný korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s vysokou hustotou. Pro teploty nad 1700 °C se používají žárovzdorné kovy (molybden, tantal, wolfram) [24, 35-37].



**Obr. 20:** Princip funkce dilatometru

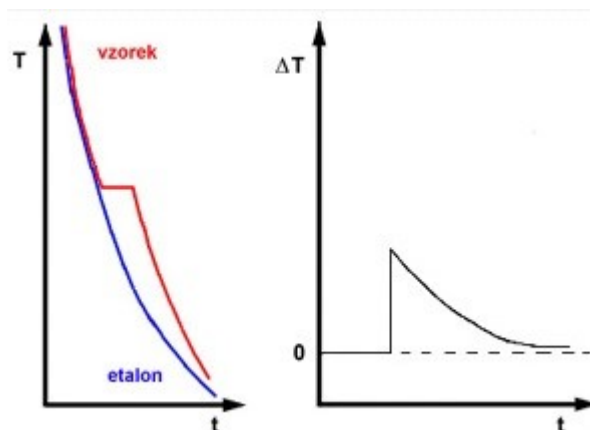
1 – vzorek, 2 – tyčinka z křemenného skla, 3 – snímač, 4 – trubička z křemenného skla [37]

### 2.5.2 Diferenční termická analýza (DTA)

Diferenční termická analýza je dynamická tepelně analytická metoda, při níž se sledují teplotní efekty zkoumaného vzorku, spojené s jeho fyzikálními nebo chemickými změnami při jeho plynulém, lineárním ohřevu nebo ochlazování. Touto metodou se měří teplotní rozdíly mezi zkoumaným vzorkem a etalonem, tedy je založena na měření teplotního rozdílu mezi skutečnou teplotou zkoumaného vzorku a teplotou definovanou zvoleným teplotním programem.



Grafický záznam závislosti rozdílu teplot obou vzorků na lineárně rostoucí nebo klesající teplotě systému, kdy se při probíhající přeměně spotřebovává nebo uvolňuje teplo a pak vykazuje zvýšení nebo snížení sledovaných teplotních rozdílů. **Obr. 21** zachycuje křivky ochlazování etalonu, resp. vzorku a příslušnou časovou závislost rozdílu teplot těchto materiálů [36, 37].



**Obr. 21:** Odvození průběhu křivek DTA [37]

### 2.5.3 Metoda měření elektrického odporu

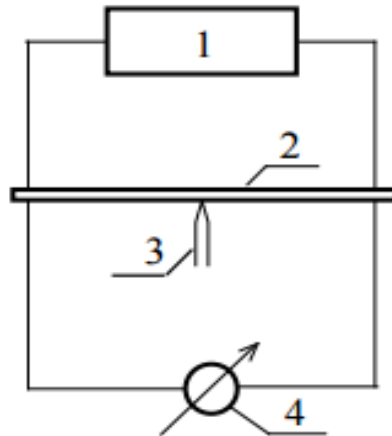
Metoda umožní, přesně a rychle stanovit transformační teploty. Je založena na měření změny elektrické vodivosti  $G[S]$  testované slitiny při změně její krystalografické struktury. Vztah mezi elektrickým odporem  $R [\Omega]$  a elektrickou vodivostí  $G$  je:

$$R = 1/G \quad (1)$$

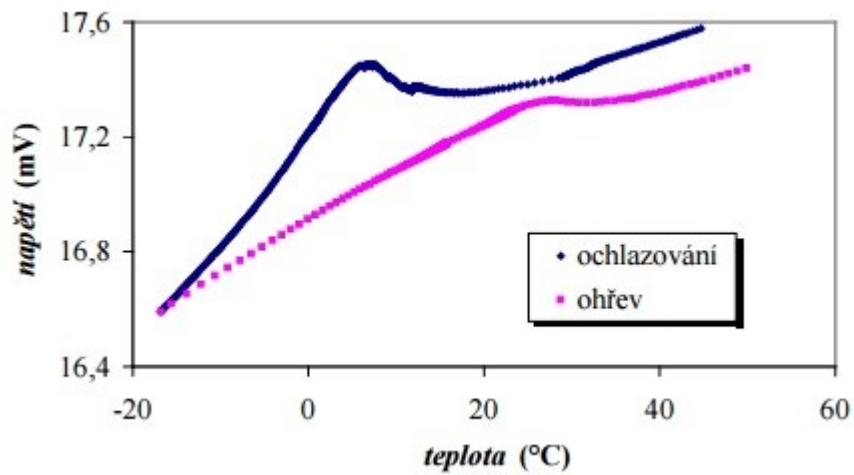
Elektrický proud  $I[A]$ , který je veden do vzorku pomocí zdroje, vyvolává spád napětí  $U [V]$ , který je měřený milivoltmetrem pomocí snímacích elektrod:

$$U = R \cdot I \quad (2)$$

Testovaný materiál je ohříván a chlazen v intervalu teplot, kde je předpokládána teplota fázové přeměny. Teplotu vzorku snímá termočlánek - viz **obr. 22** a naměřená závislost napětí na teplotě je vynesena do grafu **obr. 23** [35, 37].



**Obr. 22:** Schéma stanovení transformačních teplot čtyřkontaktní metodou měření elektrického odporu. 1 - zdroj konstantního proudu, 2 - vzorek, 3 - termočlánek, 4 – milivoltmetr [35]



**Obr. 23:** Naměřená závislost napětí na teplotě, při stanovení transformačních teplot rezistometrickou metodou [35]



### **3. Cíle práce**

Cílem diplomové práce bylo stanovit vliv teploty a velikosti deformace na teploty fázových přeměn při volném ochlazování laboratorních vývalků z nelegované nízkouhlíkové konstrukční oceli S235JR na vzduchu a porovnat je s teplotami přeměn určených dilatometrickými testy bez nebo s vlivem deformace.

K těmto účelům byla využita polospojité laboratorní válcovna tyčí a plastometr Gleeble 3800, které jsou instalovány v laboratořích Regionálního materiálově technologického výzkumného centra na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství na VŠB – Technické univerzitě Ostrava.

## 4. Laboratorní válcování tyčí a dilatometrické testy

Experimentální práce byly rozděleny do tří etap, sestávajících se z laboratorního válcování a dilatometrických testů. Pro první dvě etapy sestávající se z laboratorního válcování byla využita laboratorní polospojité válcovna tyčí, přičemž vliv velikosti deformace byl simulován dosaženým celkovým stupněm protváření na daném válcovacím pořadí. S využitím dilatometrického modulu byly, ve třetí etapě experimentálních prací, na plastometru Gleeble 3800 provedeny 2 sady dilatometrických testů bez vlivu předchozí deformace a následně také s vlivem předchozí deformace.

Pro uvedené experimentální práce byla využita nelegovaná jakostní konstrukční ocel S235JR, jejíž chemické složení dokumentuje **tab. 1**.

*Tab. 1: Chemické složení oceli S235 v hm. %*

prvek	C	Mn	Si	P	S	Al
hm. %	0,085	0,68	0,22	0,028	0,012	0,004

### 4.1 Popis provedených experimentů

#### 4.1.1 Válcování na spojitém pořadí polospojité laboratorní válcovny tyčí

Pro první etapu experimentálních prací bylo využito spojitě pořadí polospojité laboratorní válcovny tyčí, na němž se z výchozího průměru 15,8 mm vyválcovaly 4 úběry tyče o finálním průměru 9,8 mm, přičemž bylo dosaženo celkového stupně protváření  $K_p = 2,6$ :

$$K_p = \frac{S_0}{S_n} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_0^2}{4 \cdot \pi \cdot d_n^2} = \frac{15,8^2}{9,8^2} = 2,6 \quad (3)$$

Celkem bylo v této etapě odválcováno ze zkoumané oceli 6 tyčí o výchozím průměru 15,8 mm a délce 900 mm. Pět tyčí bylo jednotně předeřáno v elektrické odporové peci na teplotu 1000 °C, poté byly tyče jednotlivě ochlazovány volně vzduchu na zvolenou teplotu válcování – 800, 850, 900, 950 a 1000 °C. Po dosažení této teploty byly vloženy do další elektrické odporové pece vyhřáté na konkrétní teplotu válcování z důvodu vyrovnání teploty v celém objemu tyče a po krátké vyrovnávací výdrži byly tyče proválcovány 4 úběry na spojitě pořadí polospojité laboratorní válcovny. Šestá tyč byla ohřata na teplotu 1200 °C a po vyrovnání teploty v celém objemu tyče byla při této teplotě proválcována. Vzdálenost mezi jednotlivými stolicemi byla 1 m, obvodová rychlost válců byla pro první stolicí nastavena na

$1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , čemuž odpovídala obvodová rychlost válců ve čtvrté stolici  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Vyválnované tyče o průměru 9,8 mm byly ochlazovány na válečkovém dopravníku volně na vzduchu a při tom byla měřena teplotním skenerem LandScan jejich povrchová teplota. Tímto způsobem byly získány ochlazovací křivky při ochlazování jednotlivých vývalků až do teploty  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kromě toho byla pomocí dalšího teplotního skeneru, umístěného hned za čtvrtou stolicí hodovního pořadí, registrována i povrchová teplota vývalku bezprostředně po jeho doválnování.

Tato část experimentu byla provedena a publikována již v roce 2015, pro mou diplomovou práci jsem ale využil naměřená data, které jsem znovu zpracovával a vyhodnocoval.

#### **4.1.2 Válnování na předválnovací stolici polospojité laboratorní válcovny tyčí**

Pro druhou etapu experimentálních prací byly ze zkoumané oceli připraveny tyče o výchozím průměru 20 mm a délce 500 mm, které byly na vratné předválnovací stolici polospojité laboratorní válcovny tyčí proválnovány dvěma úběry na finální průměr 15,8 mm, přičemž bylo dosaženo celkového stupně protváření  $K_p = 1,6$ :

$$K_p = \frac{S_0}{S_n} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_0^2}{4 \cdot \pi \cdot d_n^2} = \frac{20^2}{15,8^2} = 1,6 \quad (4)$$

Válnováním připravených tyčí na předválnovací stolici bylo tedy dosaženo, ve srovnání s válnováním na spojitým pořadí, menšího protváření a menší deformace v příčném průřezu tyče.

Tímto způsobem bylo proválnováno celkem 8 tyčí. Všechny tyto tyče byly jednotně ohřáty v elektrické odporové peci na teplotu  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , poté byly tyče jednotlivě ochlazovány volně vzduchu na zvolenou teplotu válnování – 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150 a  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (2x). Po dosažení této teploty byly tyče vloženy do další elektrické odporové pece vyhřáté na konkrétní teplotu válnování z důvodu vyrovnání teploty v celém objemu tyče a po této krátké vyrovnávací výdrži byly tyče proválnovány 2 úběry na vratné předválnovací stolici polospojité laboratorní válcovny. Vyválnované tyče, byly stejně jako v minulém případě, ochlazovány volně na vzduchu, přičemž byla opět s využitím teplotního skeneru měřena jejich povrchová teplota. Tímto způsobem byly získány ochlazovací křivky do teploty cca  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kromě toho byly pomocí dalších teplotních skenerů registrovány povrchové teploty provalků, resp. vývalků před i po jednotlivých úběrech.

Naměřená data byly následně zpracovány a ze všech vývalků byly odebrány vzorky pro metalografické analýzy, které byly prováděny na příčných řezech jednotlivých vývalků.

#### 4.1.3 Dilatometrické testy na plastometru Gleeble 3800

Ve třetí etapě byly provedeny, s využitím dilatometrického modulu, na plastometru Gleeble 3800 dvě sady dilatometrických testů. Jednou ze základních předností tohoto universálního plastometru je možnost zkoumat na jednom zařízení kombinovaný vliv rychlosti ochlazování a definované předchozí deformace. První sada dilatometrických testů byla provedena bez vlivu předchozí deformace. Následně byla provedena druhá sada dilatometrických testů s vlivem předchozí deformace. Na základě dosažených výsledků byl sestrojen ARA diagram zkoumané oceli bez i s vlivem deformace.

Pro tento účel byly připraveny ze zkoumané oceli válcovité vzorky o průměru 6 mm a délce 86 mm. Tyto vzorky byly jednotně austenitizovány při teplotě 900 °C s výdrží po dobu 120 s. Poté byly vzorky ochlazovány zvolenými konstantními rychlostmi na teplotu 25 °C. V případě dilatometrických testů byly zkoušené vzorky ještě při teplotě 900 °C podrobeny tlakové deformaci o velikosti skutečné logaritmické deformace  $\epsilon = 0,35$  při deformační rychlosti  $1 \text{ s}^{-1}$ , po níž následovalo jejich řízené ochlazování opět na teplotu 25 °C. Parametry jednotlivých testů jsou souhrnně dokumentovány v **tab. 2**.

**Tab. 2:** Parametry jednotlivých dilatometrických testů

označení vzorku	teplota ohřevu	rychlost ohřevu	výdrž	teplota deformace	velikost deformace	deformační rychlost	rychlost ochlazování
	[°C]	[°C·s <sup>-1</sup> ]	[s]	[°C]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[°C·s <sup>-1</sup> ]
F1	900	10	120	---	---	---	1,5
F2	900	10	120	---	---	---	3
F3	900	10	120	---	---	---	7
F4	900	10	120	---	---	---	15
F5	900	10	120	---	---	---	0,5
F6	900	10	120	---	---	---	25
F7	900	10	120	---	---	---	0,2
D1	900	10	120	900	0.35	1	15
D2	900	10	120	900	0.35	1	7
D3	900	10	120	900	0.35	1	3
D4	900	10	120	900	0.35	1	25
D5	900	10	120	900	0.35	1	0,2
D6	900	10	120	900	0.35	1	0,5

#### 4.2 Použité experimentální zařízení

Pro experimentální práce byla využita především laboratorní polospojité válcovna tyčí a universální plastometr Gleeble 3800, přičemž obě tyto zařízení jsou umístěny v laboratořích

Regionálního materiálově technologického výzkumného centra na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství na VŠB – Technické univerzitě Ostrava.

#### 4.2.1 Polospojité válcovna tyčí

Tato laboratorní válcovna je rozdělena do dvou pořadí – předválcovací a hotovní. Předválcovací pořadí tvoří jedna vratná duo stolice a hotovní pořadí je tvořeno čtyřmi stolicemi, ve kterých jsou provalky válcovány spojitým způsobem.

Tato trať je určena především pro:

- simulaci vybraných procesů válcování na jemných profilových a drátových tratích, kde dochází k ovlivňování vývoje struktury,
- optimalizaci mechanických vlastností vývalků termomechanickým zpracováním a řízeným ochlazováním,
- zhutňování kovových prášků.

Předválcovací vratná stolice (viz **obr. 24**) je osazena válci o maximálním průměru 350 mm. Na válcích opatřených kruhovými zářezy je možno vyválcovat kruhové tyče o průměru 15,8 mm z nápichu kulatiny 55 mm. Takto naválcované tyče pak lze dále válcovat na spojitém pořadí na menší průměry. Na další sadě válců lze naválcovat tyče čtvercového průřezu 14 mm z nápichu kvadrátu 45 mm nebo kulatiny 50 mm. Hladká část obou sad válců je využívána pro tváření velkých vstupních polotovarů (kvadrát 84 mm).



**Obr. 24:** Předválcovací stolice s max. průměrem válců 350 mm [38]

Spojité hotovní pořadí (viz **obr. 25**) je složeno ze čtyř samostatně poháněných válcovacích stolic, s uspořádáním H-V-H-V a volitelnou mezistolicovou vzdáleností

(min. 1,0 m). Na tomto hlavním pořadí lze válcovat z nápichu kulatiny o průměru 20,0 – 6,4 mm kruhové tyče o průměru 12,3 – 4,2 mm při válcovací rychlosti až 2,5 m/s.



**Obr. 25:** Čtyřstolicové spojitě pořadí laboratorní válcovny tyčí [38]

Bezprostředně za spojitým hotovným pořadím je instalována ochlazovací sekce, na které lze laboratorní vývalky ochlazovat třemi způsoby. První způsob představuje volné ochlazování vývalků, umístěných na válečkovém dopravníku, na vzduchu. Další možností je ustavení kalící vany přímo za poslední stolicí hotovního pořadí a tím pádem je možno vývalky zakalit do vody bezprostředně po vyválnování. Třetí možností je řízené ochlazování laboratorních vývalků jejich průchodem třemi trubicemi, ve kterých proudí pod nastaveným tlakem chladicí voda.

Pro měření povrchových teplot vývalku se využívají čtyři vysokorychlostní skenery (rozsah 300 – 1400 °C), které lze variabilně rozmístit na různá místa válcovací tratě.

V průběhu válcování lze v závislosti na čase registrovat polohu válcovací mezery, válcovací síly, krouticí momenty, otáčky válců a povrchové teploty vývalků. Všechna naměřená data jsou pak ukládána v řídicím počítači.

Pro ohřev materiálů na zvolené teploty válcování lze využít stacionární plynovou pec (až do teploty 1300 °C) a jednu stacionární či několik mobilních elektrických odporových pecí, s délkou nístěje až 1,2 m [39, 40].

#### 4.2.2 Plastometr Gleeble 3800

Plastometr Gleeble 3800 je plně integrovaný teplotně-mechanický testovací systém (viz **obr. 26**), na kterém lze díky mnoha patentovaným technikám a díky speciálnímu řídicímu počítačovému systému provádět širokou škálu testů. Mezi ně patří především dynamické tepelně mechanické zkoušení, simulace reálných víceúběrových procesů tváření, dilatometrické testy i s vlivem předchozí deformace nebo tepelného zpracování kovových materiálů.



**Obr. 26:** *Universální plastometr Gleeble 3800*

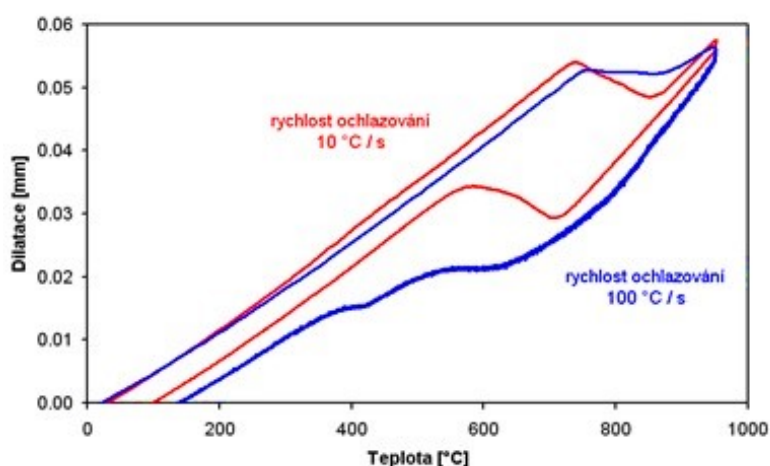
Elektrickým odporovým ohřevem lze zkoušené vzorky ohřívat maximální rychlostí  $10000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  až na teplotu  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Měření povrchové teploty se provádí pomocí čtyř navařených termočlánků. Teplota je stejně jako další veličiny zaznamenávána s frekvencí max. 50 kHz do řídicího počítače.

Ochlazování zkoušeného vzorku lze realizovat několika způsoby. Prvním způsobem je vzorek ochlazován řízeným odvodem tepla do upínacích čelistí. Dalším způsob představuje kombinaci řízeného odvodu tepla do upínacích čelistí a ofuku vzorku pomocí speciálních trysek stlačeným vzduchem. Kromě toho lze také zkušební vzorky zakalit vodou.

Jelikož byl pro můj experiment využit dilatometrický modul plastometru Gleeble 3800, zaměřím se dále na stručný popis tohoto modulu.

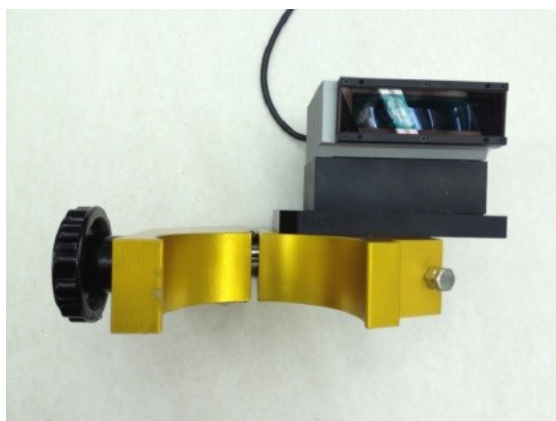


Pomocí dilatometrických testů se určují teploty fázových přeměn a sestavují se izotermické i anizotermické rozpadové diagramy materiálu bez i s aplikací předchozí deformace. Maximální aplikovaná teplota pro tento typ testu je 1200 °C a maximální rychlost ochlazování 100 °C·s<sup>-1</sup> je pro tento typ testu omezena předchozí tlakovou deformací. Vliv rychlosti ochlazování na tvar dilatometrických křivek je zobrazen na **obr. 27**.



**Obr. 27:** Vliv rychlosti ochlazování na tvar dilatometrických křivek (nizkougliková ocel) [36]

V roce 2015 byl plastometr Gleeble 3800 dovybaven bezkontaktním optickým dilatometrem, díky němuž je možno měřit přes příčný průřez vzorku jeho dilataci během ohřevu či ochlazování s přesností až 0,00001 mm. Tento optický dilatometr, který je složen z vysílače, přijímače a zobrazovacího panelu – viz **obr. 28** [41].



a) vysílač

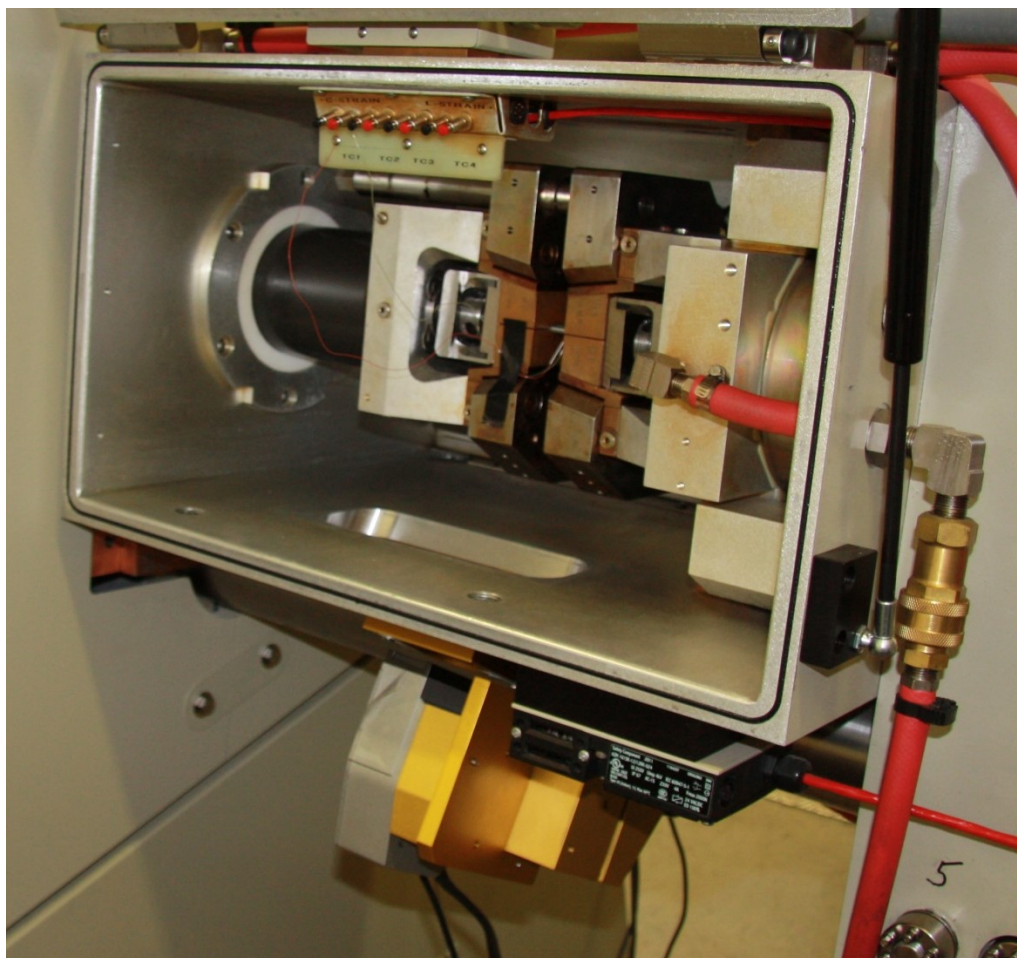


b) zobrazovací panel

**Obr. 28:** Bezkontaktní dilatometr



Vysílač, resp. přijímač se ustavují nad a pod pracovní komoru, která je vybavena speciálními průzory, jimiž prochází zelený LED paprsek, kterým je snímána dilatace zkoušeného vzorku. Příklad umístění zkoušeného vzorku uchyceného v čelistech plastometru a přijímače uchyceného pod pracovní komorou dokumentuje **obr. 29**.



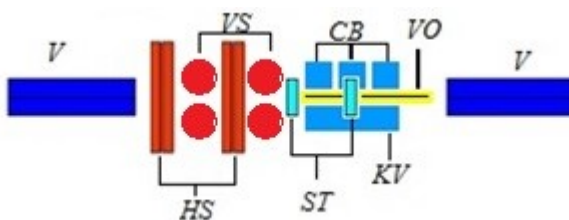
**Obr. 29:** Zapojení dilatometru v pracovním režimu

Použití optického dilatometru kromě vysoké přesnosti umožňuje snadnější umístění zkušebního vzorku do zkušební komory, což výrazně urychluje prováděné testy. Samozřejmostí je úplná kompatibilita optického dilatometru s plastometrem Gleeble 3800 a tím pádem lze všechna zaznamenaná data ukládat v řídicím počítači a dále je zpracovávat ve speciálním CCT software, který je určený pro vyhodnocení dilatometrických testů a pro tvorbu rozpadových diagramů.

## 5. Zpracování naměřených dat a analýza ochlazovacích křivek

### 5.1 Vyhodnocení naměřených dat z laboratorního válcování

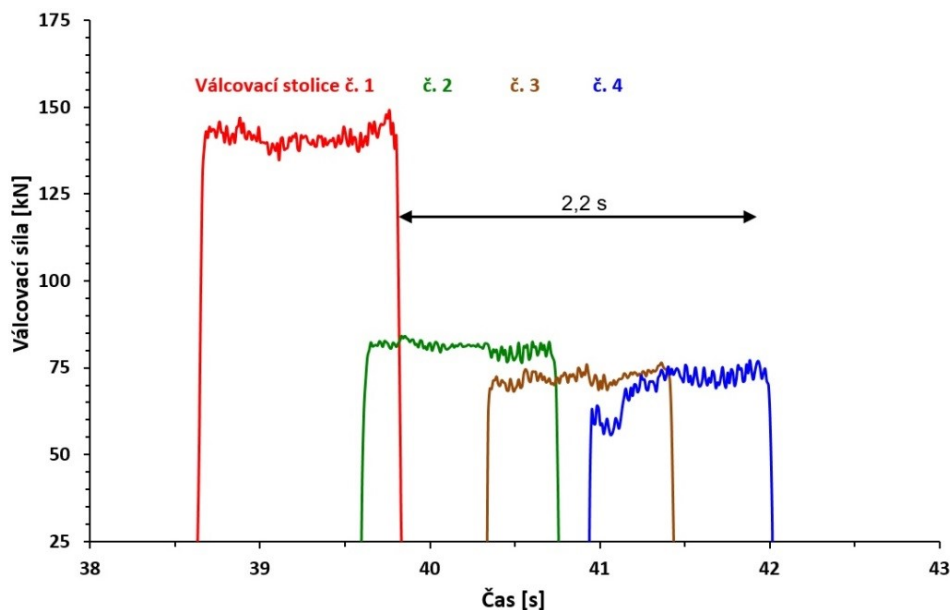
Při laboratorním válcování byly počítačově registrovány válcovací síly, otáčky, momenty, velikosti válcovacích mezer. Kromě toho byly pomocí vysokorychlostních teplotních skenerů měřeny povrchové teploty vývalků. Umístění teplotních skenerů na spojitém pořadí laboratorní válcovny představuje **obr. 30**.



**Obr. 30:** Umístění teplotních skenerů na spojitém pořadí

*ST* - stanoviště teplotních skenerů; *V* – válečkový dopravník; *HS* – horizontální stolice; *VS* – vertikální stolice; *CB* – kalící box; *KV* – kalící vana; *VO* – volné ochlazování

Příklad měřených válcovacích sil v závislosti na čase, při válcování tyčí na spojitém pořadí při výchozí teplotě 800 °C, uvádí graf na **obr. 31**, který dokonale znázorňuje spojitost tratě a ukazuje, že válcovaný materiál byl v každém okamžiku tvářen najednou dvěma stolicemi.



**Obr. 31:** Časový průběh válcovacích sil při válcování na spojitém pořadí

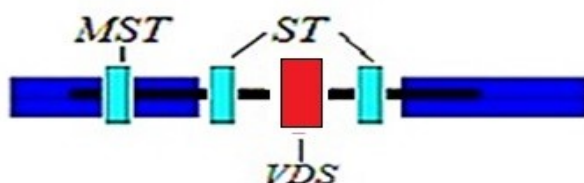
Na **obr. 31** ještě můžeme vidět, že k intenzivnímu protváření určité části tyče celkem čtyřmi úběry došlo během cca 2,2 s.

Průměrné teploty válcování tyčí na spojitém pořadí  $T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$  se určovaly z teplot před prvním úběrem a z povrchových teplot vývalků naměřených teplotním skenerem po čtvrtém úběru. Porovnání teplot vývalků po válcování na spojitém pořadí dokumentuje **tab. 3**. U vývalků S1 – S3 lze vidět, že během válcování na spojitém pořadí, při daných teplotních podmínkách, došlo k ohřátí vývalku během jeho válcování vlivem deformačního tepla. Při nižších teplotách válcování byl tento jev výraznější.

**Tab. 3:** Povrchové teploty tyčí při válcování na spojitém pořadí

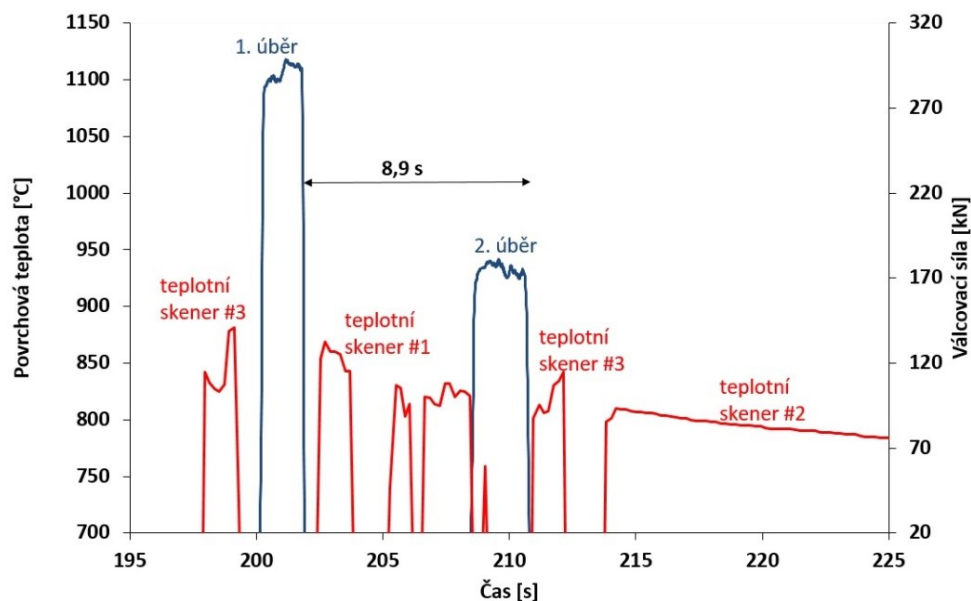
Označení vývalku	S6	S5	S4	S3	S2	S1
Teplota před 1. úběrem [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1200	1000	950	900	850	800
Teplota po 4. úběru [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1112	972	936	905	870	876
$\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-88	-28	-14	5	20	76
$T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$	1156	986	943	903	860	838

Při válcování tyčí na předválcovací stolici byly také měřeny povrchové teploty vývalků pomocí teplotních skenerů, jejichž rozmístění je zobrazeno na **obr. 32**. Z toho obrázku je tedy patrné, že povrchová teplota byla snímána vždy před každým úběrem a také při volném ochlazování vyválcovaných tyčí.



**Obr. 32:** Umístění teplotních skenerů na předválcovacím pořadí  
*ST - stanoviště teplotních skenerů; MST - mobilní stanoviště teplotních skenerů;*  
*VDS – vratná duo stolice*

Na **obr. 33** je možno vidět graf, pro vývalek ohřátý na teplotu  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  a následně válcovaný, který znázorňuje závislost síly na čase a část průběhu povrchové teploty vývalku v závislosti na čase.



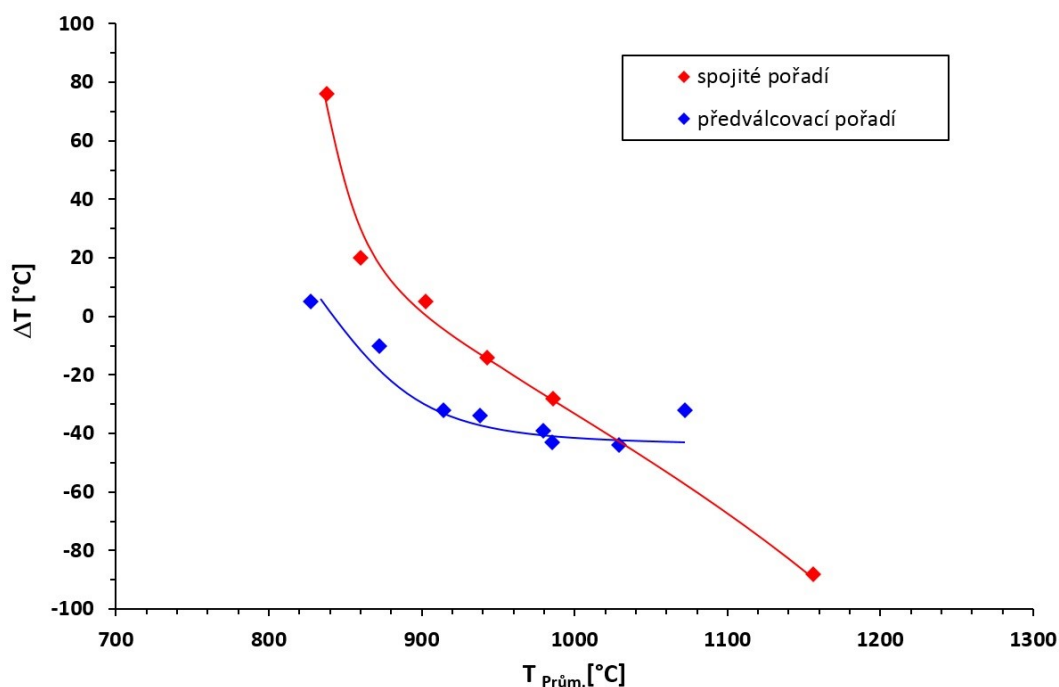
**Obr. 33:** Časový průběh válcovacích sil při válcování na předválcovací stolici

Vlivem reverzace válců předválcovací stolice a vlivem manipulačních prostojů (při ručním zavádění provačku do vběhové armatury) docházelo k výraznému poklesu teploty provačků před 2. úběrem – viz **tab. 4**. V tomto případě byla proto průměrná teplota doválcování  $T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$  stanovena z povrchové teploty provačku před 2. úběrem a z povrchové teploty vývalku naměřené ihned po doválcování. Stejným způsobem byl určen i rozdíl povrchových teplot provačků  $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$ , resp. vývalků před a po 2. úběru. U tohoto způsobu válcování došlo k malému navýšení teploty po posledním průchodu jen u vývalku P1. V ostatních případech nemělo deformační teplo moc velký účinek.

**Tab. 4:** Povrchové teploty tyčí při válcování na předválcovací stolici

Označení vývalku	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
Teplota před 1. úběrem [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1200	1200	1150	1100	1050	1000	950	900
Teplota před 2. úběrem [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1007	1088	1051	999	955	930	877	825
Teplota po 2. úběru [ $^{\circ}\text{C}$ ]	964	1056	1007	960	921	898	867	830
$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	-43	-32	-44	-39	-34	-32	-10	5
$T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$	986	1072	1029	980	938	914	872	828

Porovnání účinku deformačního tepla, vyjádřeného přes  $\Delta T$  [°C], při válcování tyčí na spojitém a předválcovacím pořadí dokumentuje **obr. 34**. Při nižších teplotách válcování byl účinek vlivu deformačního tepla velký, zejména při válcování tyčí na spojitém pořadí laboratorní válcovny. U válcování tyčí na předválcovacím pořadí laboratorní válcovny nebyl účinek deformačního tepla prakticky žádný. Pouze při nejnižší doválcovací teplotě došlo k nárůstu teploty vývalku o 5 °C.

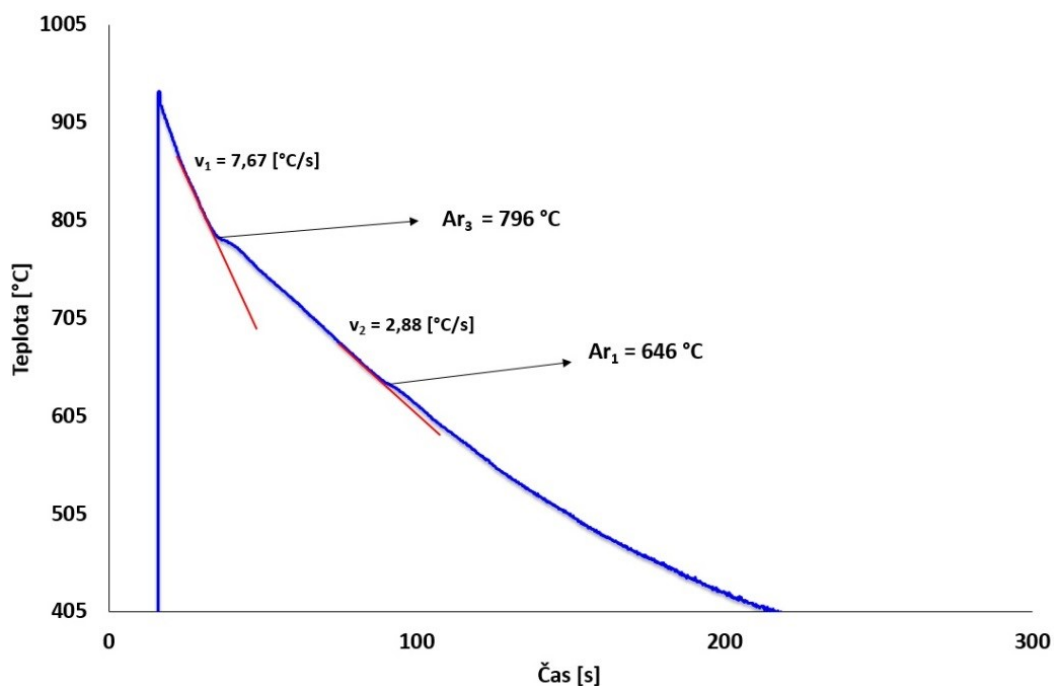


**Obr. 34:** Účinek deformačního tepla při válcování na spojitém a předválcovacím pořadí

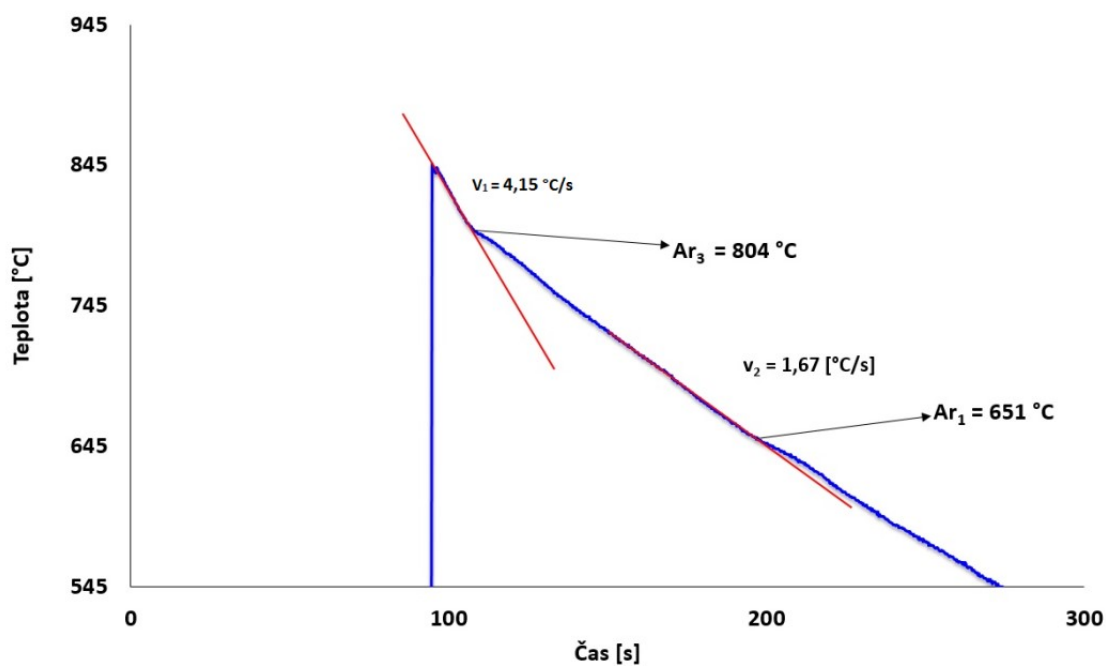
Ochlazovací křivky jednotlivých vývalků byly analyzovány za účelem určení teplot fázových transformací  $Ar_3$  (teplota odpovídající počátku vzniku feritu) a  $Ar_1$  (teplota odpovídající počátku vzniku perlitu) při ochlazování zkoumané oceli. Finální rozměry (zejména průměr) vyválcovaných tyčí ovlivnily rychlost ochlazování při jejich volném chladnutí na vzduchu.

Příklad ochlazovacích křivek pro tyče válcované na spojitém hotovním pořadí a pro tyče válcované na předválcovací stolici dokumentují **obr. 35** a **obr. 36**. Ochlazovací křivky byly proloženy tečnami (na **obr. 35** a **obr. 36** znázorněny červenou barvou). V místě odklonu tečen od ochlazovacích křivek byly určeny teploty  $Ar_3$  a  $Ar_1$ . Poté byly pomocí programu Origin určeny rychlosti ochlazování všech vyválcovaných tyčí před počátkem fázových transformací. Průměrná rychlost ochlazování, tyčí válcovaných na spojitém pořadí, před dosažením teploty  $Ar_3$  byla  $v_1 = 7,71 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ , resp.  $v_2 = 2,88 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  před dosažením teploty  $Ar_1$ .

V případě tyčí válcovaných na předválcovací stolici, byla průměrná rychlost ochlazování před dosažením teploty  $Ar_3$   $v_1 = 4,32 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ , resp.  $v_2 = 1,68 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  před dosažením teploty  $Ar_1$ . Určené teploty fázových přeměn a rychlosti ochlazování jednotlivých vývalků jsou uvedeny v **tab. 5** a **tab. 6**.



**Obr. 35:** Ochlazovací křivka vývalku S4



**Obr. 36:** Ochlazovací křivka vývalku P2

**Tab. 5:** Teploty fázových přeměn a rychlosti ochlazování vývalků válcovaných na spojitém pořadí

$T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$	$v_1 [^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}]$	$Ar_3 [^{\circ}\text{C}]$	$v_2 [^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}]$	$Ar_1 [^{\circ}\text{C}]$
1156	8,60	786	2,75	644
986	7,86	795	2,95	645
943	7,67	796	2,88	646
903	7,57	798	2,81	646
860	7,07	807	2,97	644
838	7,50	809	2,91	643

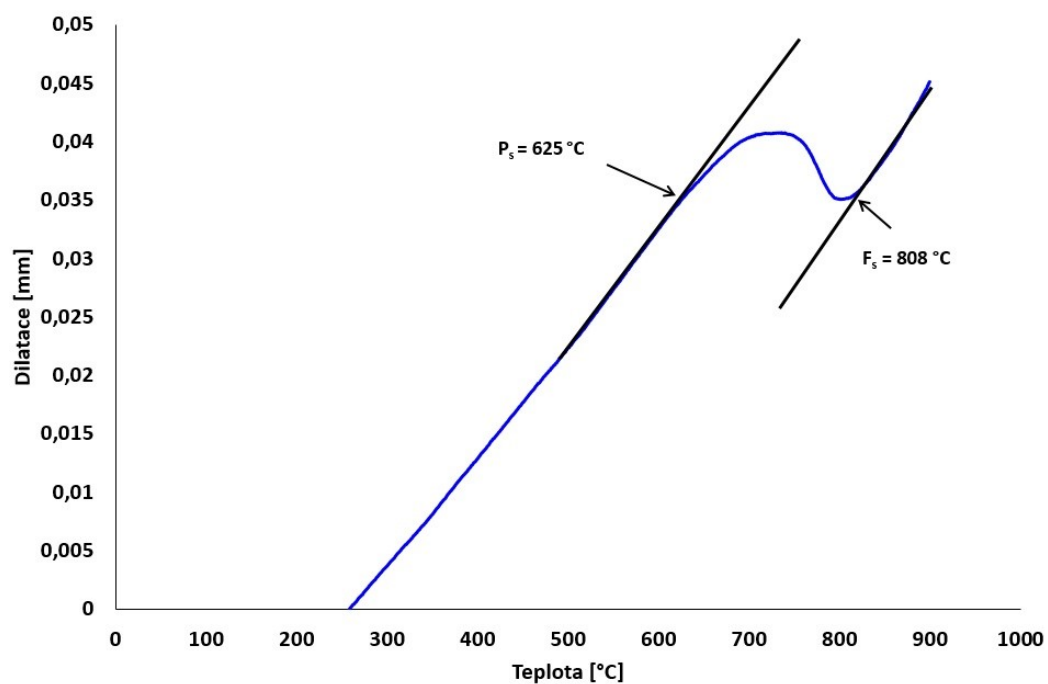
**Tab. 6:** Teploty fázových přeměn a rychlosti ochlazování vývalků válcovaných na předválcovací stolici

$T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$	$v_1 [^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}]$	$Ar_3 [^{\circ}\text{C}]$	$v_2 [^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}]$	$Ar_1 [^{\circ}\text{C}]$
986	4,48	796	1,74	651
1072	4,67	796	1,65	648
1029	4,60	796	1,65	653
980	4,15	797	1,65	655
938	4,06	797	1,65	642
914	4,10	798	1,71	651
872	4,15	804	1,67	651
828	4,10	812	1,70	649

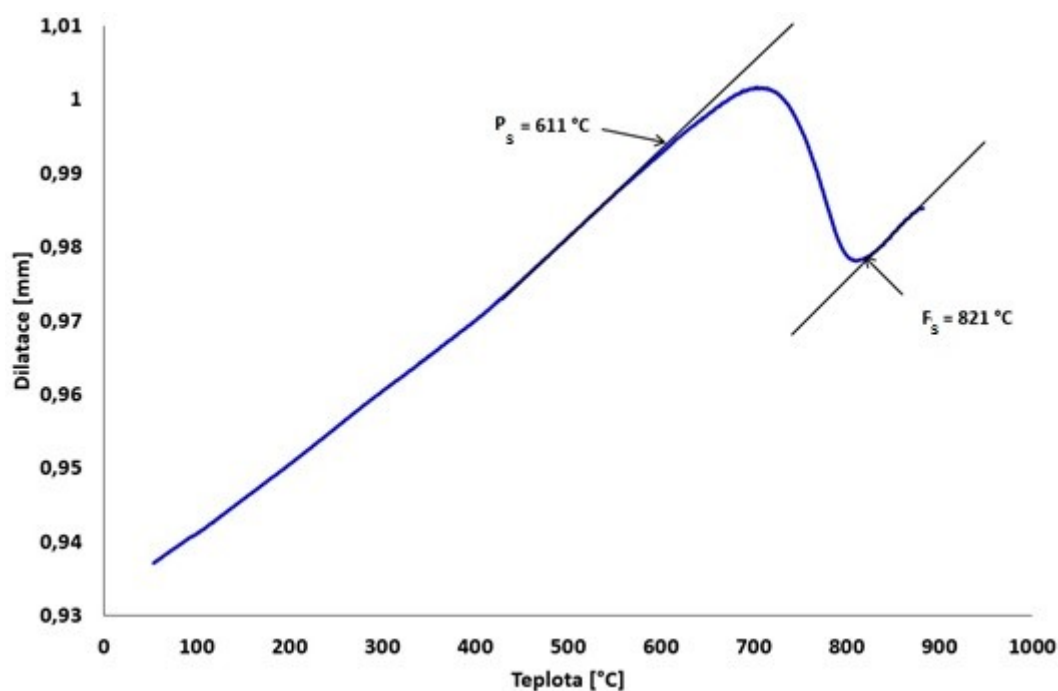
## 5.2 Vyhodnocení dilatometrických křivek

Dilatometrické zkoušky byly vyhodnocovány ve speciálním CCT software, který byl dodán spolu s plastometrem Gleeble 3800 a který je určen pro vyhodnocování dilatometrických testů a pro tvorbu rozpadových diagramů. Analyzovány byly hlavně dilatační křivky, tj. křivky představující závislost dilatace vzorku při jeho ochlazování v závislosti na naměřené teplotě. Příklad dilatační křivky získané dilatometrickým testem bez deformace při rychlosti ochlazování  $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  je zobrazen v **obr. 37**, příklad dilatační křivky získané dilatometrickým testem s deformací vzorku a s následným ochlazováním také rychlostí  $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  zobrazuje **obr. 38**. Tyto křivky byly stejně jako v předchozím případě proloženy tečnami a v místech odklonu dilatačních křivek tečen byly určeny teploty  $F_s$  ( $Ar_3$ ) a  $P_s$  ( $Ar_1$ ).





**Obr. 37:** Analýza dilatační křivky a stanovení teplot fázových přeměn pro rychlost ochlazování  $7\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$  bez předchozí deformace



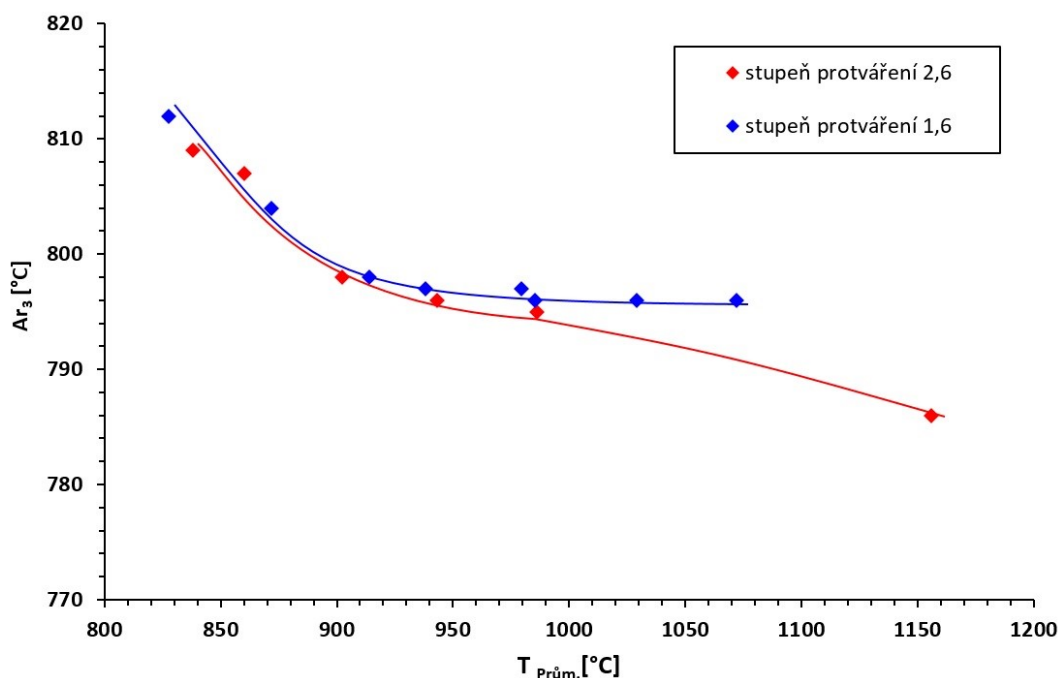
**Obr. 38:** Analýza dilatační křivky a stanovení teplot fázových přeměn pro rychlost ochlazování  $7\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$  s vlivem předchozí deformace



## 6. Diskuse výsledků

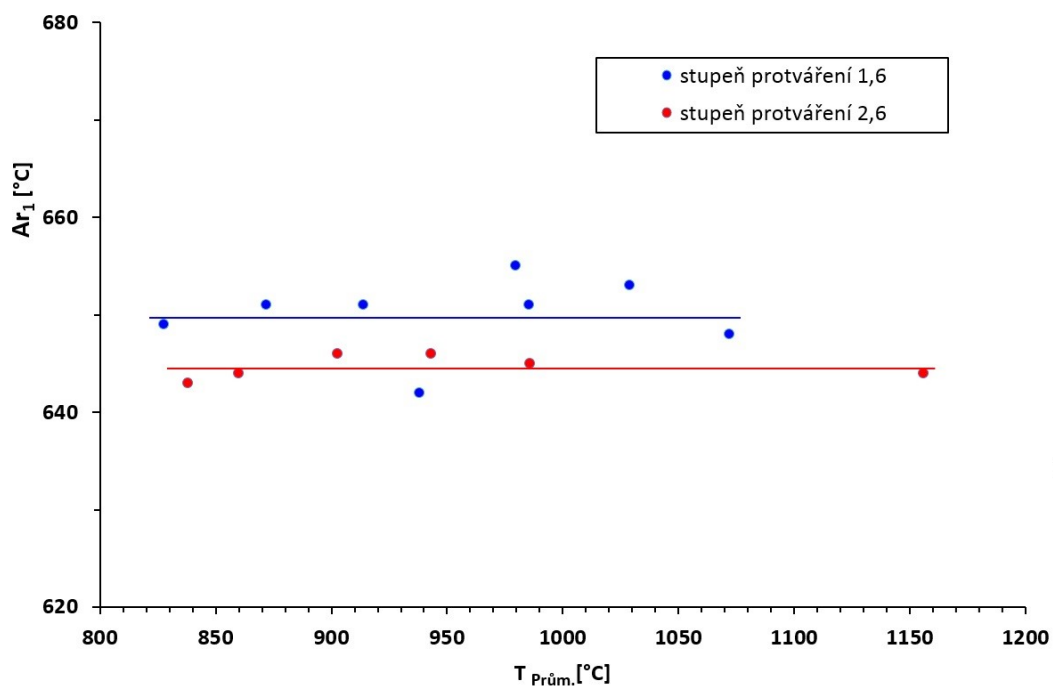
Na základě výsledků získaných analýzou ochlazovacích křivek laboratorních vývalků byly sestaveny grafy závislosti teplot fázových transformací na průměrné teplotě válcování – viz **obr. 39** pro teplotu  $Ar_3$  a **obr. 40** pro teplotu  $Ar_1$ .

Podle grafu na **obr. 39** lze usuzovat, že teplota  $Ar_3$  roste s klesající průměrnou teplotou válcování. Z tohoto grafu je také patrné, že různý stupeň protváření laboratorních vývalků prakticky neovlivnil velikost teplot  $Ar_3$ . Větší rychlost ochlazování by měla teploty  $Ar_3$  snížit, ale intenzivnější deformace, zřejmě v důsledku jemnějšího austenitického zrna a kumulace větší deformační energie za nízkých teplot, je naopak zvyšuje.



**Obr. 39:** Průběh teplot  $Ar_3$  u spojitého a předválcovacího pořadí

Z grafu na **obr. 40** lze vidět, že větší stupeň protváření měl za následek mírný pokles teplot  $Ar_1$ . Vliv průměrné teploty válcování na velikost teplot  $Ar_1$  nebyl prokázán.

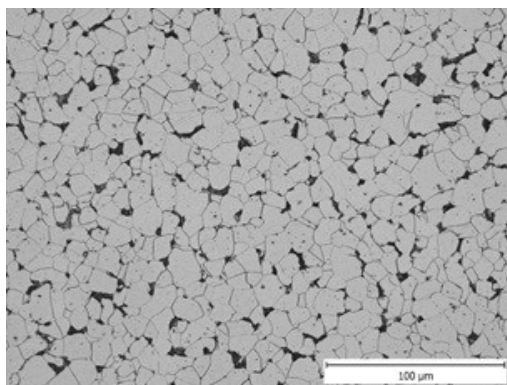


**Obr. 40:** Průběh teplot  $Ar_1$  u spojitého a předválcovacího pořadí

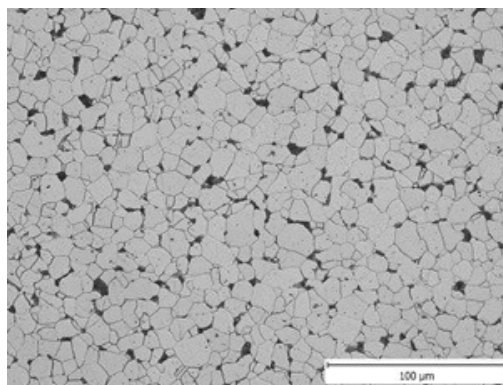
Metalografickou analýzou byla zkoumána mikrostruktura všech laboratorních vývalků. Fotodokumentace mikrostruktury vývalků vyválcovaných s celkovým stupněm protváření 2,6 je zobrazena na **obr. 41**. Na **obr. 42** je uvedena fotodokumentace mikrostruktury vývalků vyválcovaných s celkovým stupněm protváření 1,6.

Struktura těchto laboratorních vývalků byla tvořena směsí feritu (majoritní podíl) a perlitu. Již z těchto fotodokumentací struktury je patrné, že vyšší teplota válcování měla za následek dosažení hrubozrnnější mikrostruktury.

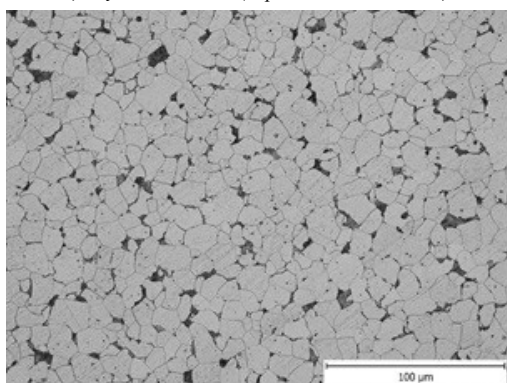
V případě hodnocení mikrostruktury laboratorních vývalků je nutné uvažovat jednak s velikostí původního austenitického zrna, ale především i s uzdravovacími procesy během jejich válcování. Dá se usuzovat, že v případě válcování tyčí na spojitém pořadí docházelo vlivem intenzivní deformace společně s velmi krátkými meziúběrovými pauzami k dynamické rekrytalizaci materiálu, zatímco při válcování tyčí na vratné předválcovací stolici byla časová prodleva mezi jednotlivými úběry mnohem delší a dávala šanci průběhu statické rekrytalizace.



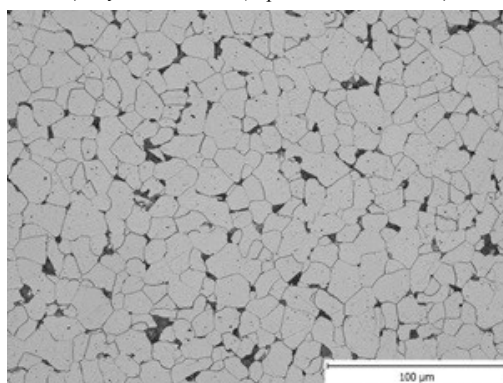
*a) vývalek S1 ( $T_{prům.} = 838\text{ °C}$ )*



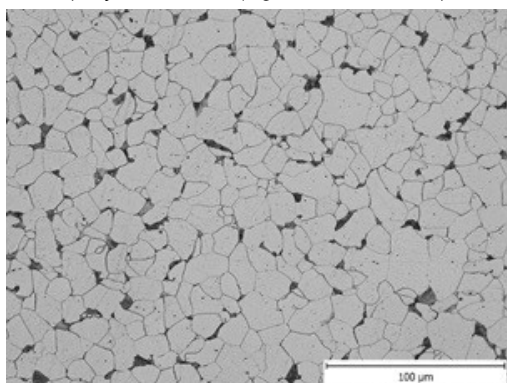
*b) vývalek S2 ( $T_{prům.} = 860\text{ °C}$ )*



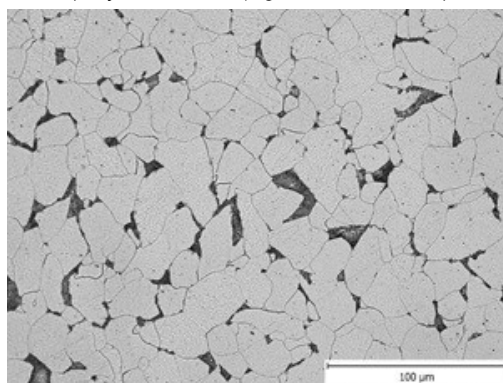
*c) vývalek S3 ( $T_{prům.} = 903\text{ °C}$ )*



*d) vývalek S4 ( $T_{prům.} = 943\text{ °C}$ )*

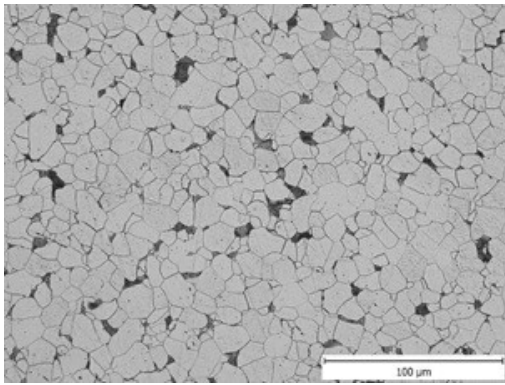


*e) vývalek S5 ( $T_{prům.} = 986\text{ °C}$ )*

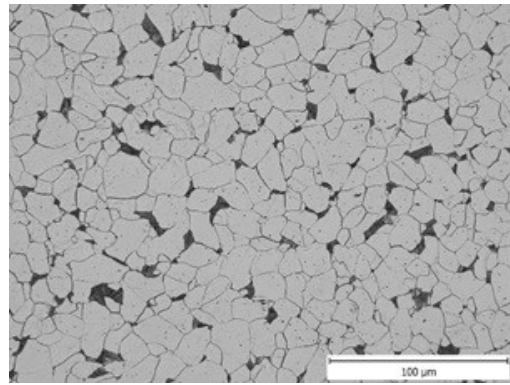


*g) vývalek S6 ( $T_{prům.} = 1156\text{ °C}$ )*

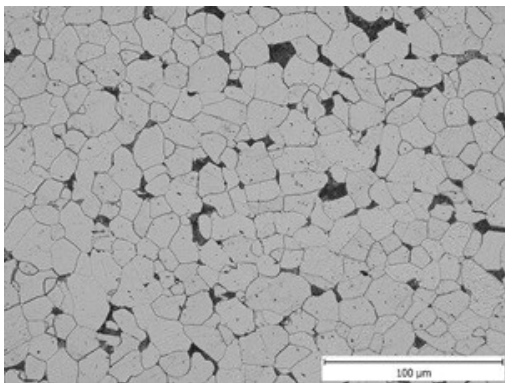
**Obr. 41:** Mikrostruktura laboratorních vývalků po válcování na spojitém pořadí laboratorní válcovny (celkový stupeň protváření  $K_p = 2,6$ )



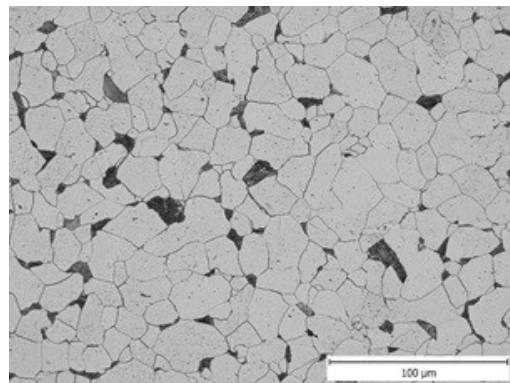
*a) vývalek P1 ( $T_{prům.} = 828\text{ °C}$ )*



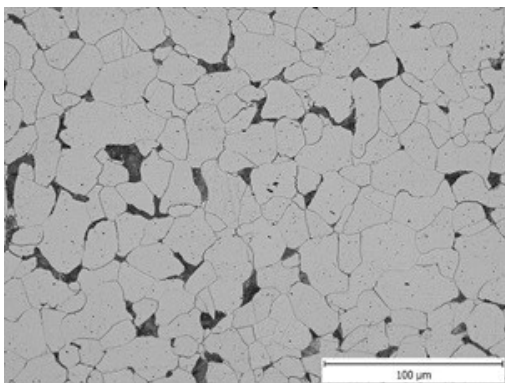
*b) vývalek P2 ( $T_{prům.} = 872\text{ °C}$ )*



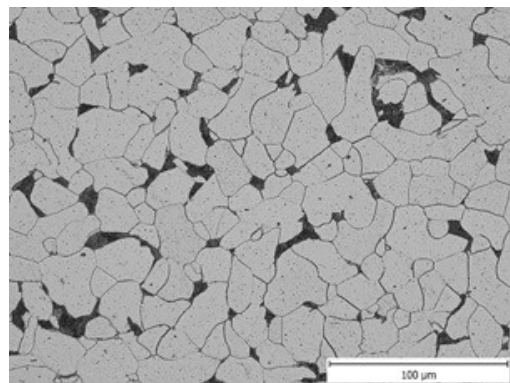
*c) vývalek P3 ( $T_{prům.} = 914\text{ °C}$ )*



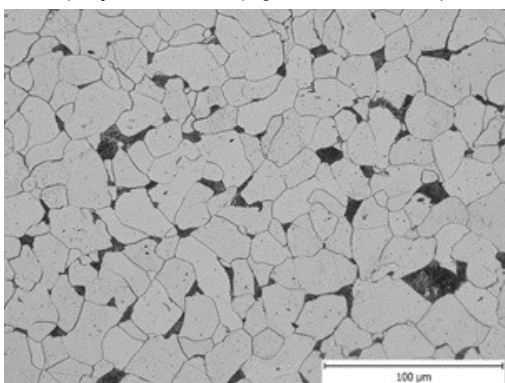
*d) vývalek P4 ( $T_{prům.} = 938\text{ °C}$ )*



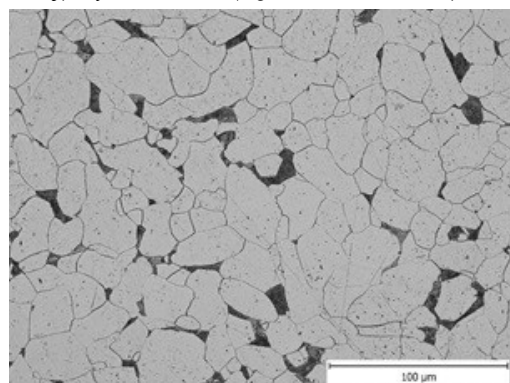
*e) vývalek P5 ( $T_{prům.} = 980\text{ °C}$ )*



*f) vývalek P6 ( $T_{prům.} = 1029\text{ °C}$ )*



*g) vývalek P7 ( $T_{prům.} = 1072\text{ °C}$ )*



*h) vývalek P8 ( $T_{prům.} = 986\text{ °C}$ )*

**Obr. 42:** Mikrostruktura laboratorních vývalků po válcování na předválcovací stoličce laboratorní válcovny (celkový stupeň protváření  $K_p = 1,6$ )

Pomocí lineární metody byl, podle normy ČSN EN ISO 643 s využitím programu Quick PHOTO MICRO, určován střední průměr zrna jednotlivých laboratorních vývalků. Výsledky jsou zobrazeny v **tab. 7** a **tab. 8**.

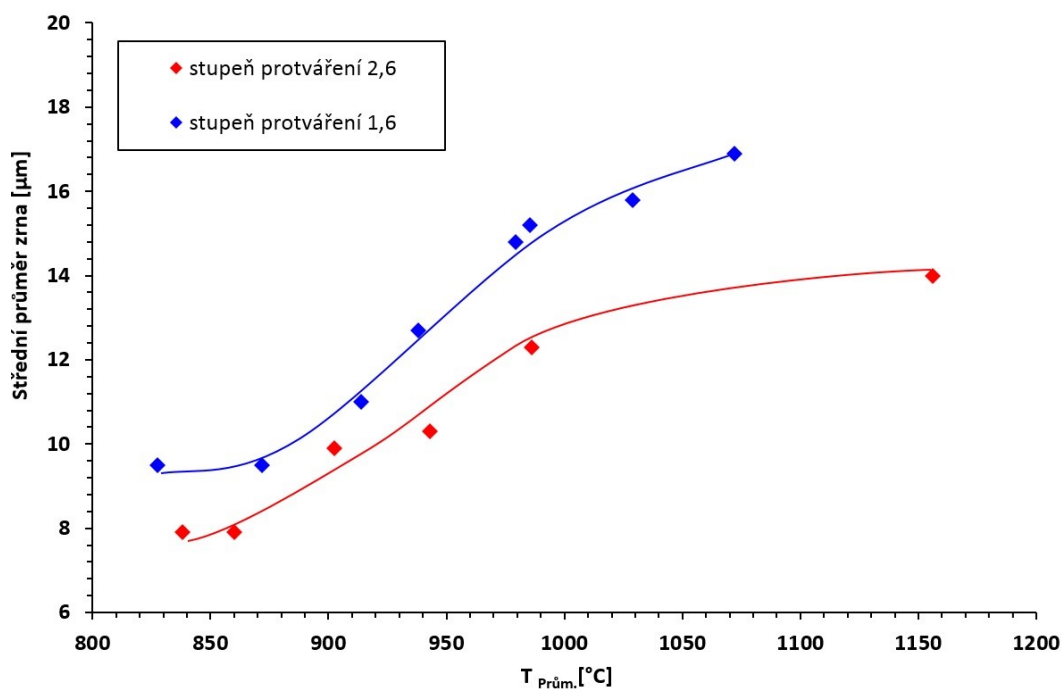
**Tab. 7:** Střední průměr zrna laboratorních vývalků vyválcovaných na spojitém pořadí

označení vzorku	$T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$	střední průměr zrna [ $\mu\text{m}$ ]
S6	1156	14,0
S5	986	12,3
S4	943	10,3
S3	903	9,9
S2	860	7,9
S1	838	7,9

**Tab. 8:** Střední průměr zrna laboratorních vývalků vyválcovaných na předválcovací stolici

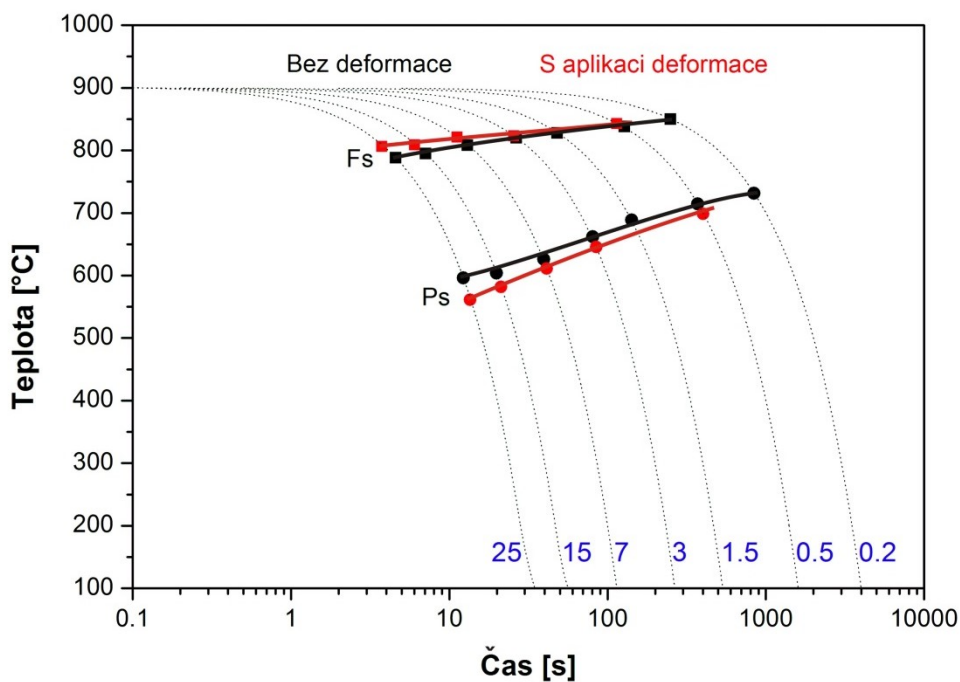
označení vzorku	$T_{\text{prům.}} [^{\circ}\text{C}]$	střední průměr zrna [mm]
P8	986	15,2
P7	1072	16,9
P6	1029	15,8
P5	980	14,8
P4	938	12,7
P3	914	11,0
P2	872	9,5
P1	828	9,5

Na základě těchto dat pak byl sestaven graf závislosti středního průměru zrna laboratorních vývalků na průměrné teplotě válcování – viz **obr. 43**. Z tohoto grafu je patrné, že stupeň protváření jednotlivých laboratorních vývalků spolu s průměrnou teplotou válcování výrazně ovlivnil výslednou průměrnou velikost zrna (ve spojitosti s předpokládaným průběhem uzdravovacích procesů). Vyšší průměrná teplota válcování vedla ke zhrubnutí zrna laboratorních vývalků. Vyšší stupeň protváření měl za následek zjemnění mikrostruktury laboratorních vývalků.



**Obr. 43:** Střední průměr zrna laboratorních vývalků

Na základě vyhodnocení všech dilatometrických křivek byl, pro dané podmínky ohřevu a rychlosti ochlazování, zkonstruován ARA diagram bez i s vlivem předchozí deformace – viz **obr. 44**.



**Obr. 44:** ARA diagram zkoumané oceli

Při zkoumaných rychlostech ochlazování byly na dilatačních křivkách zjištěny pouze teploty  $F_s$  ( $Ar_3$ ) a  $P_s$  ( $Ar_1$ ). Z tohoto diagramu je zřejmé, že aplikace deformace měla za následek posun bodů  $F_s$  k vyšším teplotám a  $P_s$  k nižším teplotám, tj. rozšíření feritické oblasti. I v případě dilatometrických testů došlo tedy vlivem deformace k posunu bodů  $P_s$  ( $Ar_1$ ) k nižším teplotám. Souřadnice bodů jednotlivých přeměn dokumentují **tab. 9** a **tab. 10**.

**Tab. 9:** Souřadnice bodů přeměn ARA diagramu bez vlivu předchozí deformace

$F_s$ ( $Ar_3$ )			$P_s$ ( $Ar_1$ )		
Rychlost ochlazování [°C·s <sup>-1</sup> ]	Čas [s]	Teplota [°C]	Rychlost ochlazování [°C·s <sup>-1</sup> ]	Čas [s]	Teplota [°C]
25	4,6	788	25	12,3	596
15	7,1	795	15	19,8	604
7	13,0	809	7	39,6	626
3	26,5	820	3	80,5	662
1,5	48,0	828	1,5	141,8	689
0,5	127,8	838	0,5	371,1	715
0,2	250,0	850	0,2	840,0	731

**Tab. 10:** Souřadnice bodů přeměn ARA diagramu s vlivem předchozí deformace

$F_s$ ( $Ar_3$ )			$P_s$ ( $Ar_1$ )		
Rychlost ochlazování [°C·s <sup>-1</sup> ]	Čas [s]	Teplota [°C]	Rychlost ochlazování [°C·s <sup>-1</sup> ]	Čas [s]	Teplota [°C]
25	3,8	806	25	13,6	561
15	6,0	809	15	21,2	582
7	11,2	821	7	41,2	611
3	25,6	823	3	84,9	646
0,5	114,0	843	0,5	402,0	699

Porovnání teplot  $Ar_3$  a  $Ar_1$  zjištěných analýzou ochlazovacích křivek laboratorních vývalků s teplotami  $Ar_3$  a  $Ar_1$  zjištěnými dilatometrickými analýzami není, z důvodu rozdílných podmínek ohřevu, deformace a ochlazování, zcela přesně vypovídající. Lze ovšem tvrdit, že dilatometrickou analýzou určené teploty  $Ar_3$  byly o cca 20 – 25 °C vyšší než v případě analogických teplot určených na základě vyhodnocení ochlazovacích křivek laboratorních vývalků.

V případě teplot  $Ar_1$  byl rozdíl mezi výsledky získanými dilatometrickými testy a analýzou ochlazovacích křivek laboratorních vývalků pouze 5 °C. S uvažováním rozptylu

naměřených dat lze rozdíly mezi teplotami  $A_{r1}$  stanovenými analýzou ochlazovacích křivek laboratorních vývalků a analogickými teplotami určenými dilatometrickou analýzou považovat jako zanedbatelné.



## 7. Závěr

S využitím laboratorní polospojité válcovny tyčí kruhového průřezu a pomocí dilatometrických testů byl zkoumán vliv parametrů tváření na teploty fázových přeměn  $Ar_3$  a  $Ar_1$  při volném ochlazování vývalků z nelegované nízkouhlíkové konstrukční oceli S235JR. Pro tento účel byly zvoleny dva režimy válcování. První z nich představoval válcování tyčí o počátečním průměru 15,8 mm na spojitým hotovným pořadí tratě; čtyřmi průchody byly s celkovým stupněm protváření 2,6 naválcovány tyče s finálním průměrem 9,8 mm. V druhém případě byla využita vratná předválcovací stolice, na níž byly válcovány dvěma úběry tyče z výchozího průměru 20 mm na finální průměr 15,8 mm při celkovém stupni protváření 1,6. Těmito režimy byl tedy simulován nejen různý stupeň protváření, ale i odlišný průběh uzdravovacích procesů během vratného či spojitého válcování, a také různé rychlosti ochlazování z válcovacích teplot cca 825 °C až 1155 °C. Dilatometrickými analýzami byl zkoumán vliv rychlosti ochlazování a předchozí deformace na teploty fázových přeměn zkoumané oceli.

S klesající průměrnou teplotou válcování se teplota  $Ar_3$  zvyšovala. Velikost celkové deformace, resp. různý stupeň protváření neměl v tomto případě výrazný vliv na velikost teplot  $Ar_3$ . Větší rychlost ochlazování tyčí vyválcovaných s větším stupněm protváření by měla teploty  $Ar_3$  snížit, ale intenzivnější deformace, zřejmě v důsledku jemnějšího austenitického zrna a kumulace větší deformační energie za nízkých teplot, je naopak zvýšila. V případě teplot  $Ar_1$  nebyl prokázán žádný vliv průměrné teploty válcování na jejich velikost. Větší stupeň protváření laboratorních vývalků měl však za následek snížení teplot  $Ar_1$ .

Mikrostruktura laboratorních vývalků byla tvořena směsí feritu a perlitu. Vyšší průměrná teplota válcování měla za následek dosažení hrubozrnnější mikrostruktury. Vyšší stupeň protváření spolu s předpokládaným průběhem dynamické rekrytalizace měl za následek zjemnění mikrostruktury laboratorních vývalků.

Na základě vyhodnocení dilatometrických testů byl pro dané podmínky ohřevu a rychlosti ochlazování zkonstruován ARA diagram bez i s vlivem předchozí deformace. Při zkoumaných rychlostech ochlazování byly na dilatačních křivkách zjištěny pouze teploty  $Ar_3$  a  $Ar_1$ . Aplikace deformace měla za následek rozšíření feritické oblasti, tj. posun bodů  $Ar_3$  k vyšším teplotám a  $Ar_1$  k nižším teplotám.

Pro účely stanovení teplot fázových přeměn při ochlazování ocelí je vhodné použít dilatometrické testy, během nichž jsou zkoumané vzorky ochlazovány konstantními

rychlostmi a jejichž výsledky lze zobrazit v podobě velmi žádaných rozpadových diagramů. V technologické praxi ovšem rychlost ochlazování tvářených výrobků nebývá konstantní a z tohoto důvodu je vhodné dilatometrické testy doplnit poměrně jednoduchými experimenty na laboratorní válcovně, které věrněji reflektují historii deformace při konkrétním technologickém postupu, jí odpovídající průběh uzdravování deformovaného austenitu a reálné podmínky ochlazování vývalků.

## Seznam použité literatury

- [1] KOLLEROVÁ, M. *Valcovanie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN80-05-00729-9.
- [2] FABÍK, R. *Tváření kovů* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2016-02-07]. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [3] ELFMARK, J. *Tváření kovů*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00651-1.
- [4] SPECIAL BAR QUALITY STEELS. [online] 2013. [cit. 2016-3-14] Dostupné z <http://ispatguru.com/special-bar-quality-steels/>
- [5] KLIBER, J. *Základy tváření kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1794-1.
- [6] LEE, Y. *Rod and bar rolling: theory and applications*. New York: Marcel Dekker, c2004. ISBN 0-8247-5649-5.
- [7] ŽÍDEK, M., KUŘE, F. *Válcování*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1986. 379 s.
- [8] KLIMEK, K., et al. *Zvyšování podílů výrobků vyšší přidanou hodnotou – cesta k udržení konkurenceschopnosti*. 2006, [ONLINE],[cit. 2016-02-03]. Dostupný z WWW: <[www.nanocon.cz/data/metal2006/sbornik/papers/216.pdf](http://www.nanocon.cz/data/metal2006/sbornik/papers/216.pdf)>.
- [9] KAWULOK, P. *Optimalizace termomechanického zpracování oceli 42CrMo4 v podmínkách profilové válcovny*. Ostrava, 2012. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tváření materiálu.
- [10] Třinecké železářny, a.s. [online]. © 2005 [cit. 2016-3-17]. Dostupné z: [http://www.trz.cz/pdf/Drat\\_2010.pdf](http://www.trz.cz/pdf/Drat_2010.pdf)
- [11] SMS MEER. *Bar and merchant bar mills*. [cit. 2016-3-17]. Dostupné z: [http://meer.msmsgroup.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/publicationgroup/langprodukte/profil/Beton\\_und\\_Feinstahl\\_EN\\_03-14.pdf](http://meer.msmsgroup.com/fileadmin/user_upload/pdf/publicationgroup/langprodukte/profil/Beton_und_Feinstahl_EN_03-14.pdf)
- [12] VAŠEK, Z., et al. Řízené ochlazování a výroba betonářských ocelí. *Hutnické listy*, 2008, roč. 61, č. 5, s. 45-49. ISSN0018-8069.
- [13] VinayakRathiSteelsRollingMillsPvt.Ltd.[online].2011.[cit.2016-3-20]Dostupné z: (<http://www.vinayakrathisteel.com/index.htm>)
- [14] EHL, R., et al. Temperature – controlled rolling of long products – current state of the art. *Stahl und Eisen international*, 2006, roč. 126, č. 5, s. S13-S18. ISSN 0340-4803.

- [15] KOCICH, R. *Termomechanické procesy tváření: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2014. ISBN 978-80-248-3586-0.
- [16] KLIBER, J. Řízené tváření. *Hutnické listy*, 2000, roč. 53, č. 4-7, s. 86-91. ISSN 0018-8069.
- [17] TEOH, L. L. Thermo-mechanical processing and microstructure of microalloyed steel bar and wire rod products. *Journal of Materials*, 1995, [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092401369401685T>
- [18] DRYDEN, J. XLERPLATE stmel [online]. 1 May 2009 [cit. 2016-02-28]. Plate Supply Condition. Dostupné z WWW: <<http://www.xlerplate.com.au/go/news/plate-supply-condition>>.
- [19] MAZANCOVÁ, E. *Moderní metody tepelného zpracování (vybrané kapitoly)*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1987. 127 s.
- [20] BOUBLI, H., et al. "DREAM STEEL" the Stefana bar mill: efficiency and throughput optimization, an aggregate of the most recent technologies. *La Revue de Métallurgie*, 2009, roč. 106, č. 7-8, s. 280-286. ISSN 2271-3646.
- [21] Třinecké železářny, a.s. [online], [cit. 2016-3-17]. Dostupné z: [http://www.trz.cz/pdf/VZ\\_TZ\\_2013.pdf](http://www.trz.cz/pdf/VZ_TZ_2013.pdf)
- [22] Dokumentace TŽ, a.s. Válcování a úprava válcovaného sortimentu v kontijemné trati provozu VJ, vydání 1. 2007, 66 s.
- [23] KOTAS, M. *Řízené válcování vybraných značek ocelí v podmínkách kontijemné válcovny Třineckých Železáren, a.s.* Ostrava 2010. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tváření materiálů.
- [24] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [25] PÍŠEK, F., et al. *Nauka o materiálu I*. 2. Vydání. Praha: Academia, 1975, 542 S.
- [26] GINZBURGH, V. *Metallurgical design of flat rolled steels*. New York: M. Dekker, 2005. 726 s. ISBN 0-8247-5847-1.
- [27] JECH, J. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1977. 400s.
- [28] Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/7018237/> [online]. [cit. 2016-03-22].

- [29] FÁZOVÉ PŘEMĚNY Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/premeny.pdf>[online]. [cit. 2016-03-22].
- [30] SILBERNAGEL, et al. M. *Nauka o kovech: pro střední průmyslové školy hutnické*. 3. vyd. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1981. 576s.
- [31] BHADESIA, H. K. D. H. Interpretation of the Microstructure of Steels [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: [http://cml.postech.ac.kr/2008/Steel\\_Microstructure/SM2.html](http://cml.postech.ac.kr/2008/Steel_Microstructure/SM2.html)
- [32] Tváření kovů: Vybrané kapitoly z tváření kovů - tažení. In: [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/633-Fabik-Vybrane-kapitoly-z-tvareni-kovu-kap-6-10.pdf>
- [33] JONŠTA, Z. *Nauka o kovech II* [Jonšta, 1990, záznam b]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990. 117 s. ISBN 80-7078-085-1.
- [34] UČEŇ, M., FILÍPEK, J. Kvantitativní stanovení produktů izotermického rozpadu austenitu[online].[cit.2016-03-22]. Dostupné z: [http://acta.mendelu.cz/media/pdf/actaun\\_2006054010127.pdf](http://acta.mendelu.cz/media/pdf/actaun_2006054010127.pdf)
- [35] JEDLIČKA, Z., HERZOGOVÁ, I. Methods of memory alloys transformation temperature measurements [online]. [cit.2016-03-26] Dostupné z: [http://konsyst.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_06/papers/59.pdf](http://konsyst.tanger.cz/files/proceedings/metal_06/papers/59.pdf)
- [36] SCHINDLER, I., KAWULOK, P. Aplikační možnosti plastometru Gleeble 3800 se simulačním modulem Hydrawedge II na VŠB-TU Ostrava. *Hutnické listy*, 2013, roč. 66, č. 4, s. 85-90. ISSN 0018-8069.
- [37] SKLENAŘÍKOVÁ, I., KURSA, M. Základní metody určování transformačních teplot při fázových přeměnách v tvarově paměťových slitinách. In: *Metal 2005*, Conference Proceedings. Ostrava: Tanger Ltd, 2005.
- [38] SCHINDLER, I., KAWULOK, P. *Deformační chování materiálu: studijní opora*. [online]. Ostrava, 2013 [cit.2016-03-30]. Dostupné z: [http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/13\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu/Schindler\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/13_Deformacni_chovani_materialu/Schindler_Deformacni_chovani_materialu.pdf)
- [39] Polospojité válcovna tyčí. [cit.2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.fmfi.vsb.cz/633/cs/veda-a-vyzkum/polospojite-valcovny-tyci-/>
- [40] SCHINDLER, I., et al. Vliv spojitého laboratorního válcování na vlastnosti kruhových tyčí z konstrukční oceli S355J2. *Hutnické listy*, 2013, roč. 66, č. 4, s. 13-17. ISSN 0018-8069.

- [41] Interní dokumentace - Non-Contact Scanning Optical System User's Manual. Ostrava, 2016. [cit.2016-03-31].